

**Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg**  
**Fakultät Life Sciences**

„Eignungsanalyse einer Wärmepumpe für Bestandsbauten in  
Kombination mit Photovoltaik und Speichersystem“

Bachelorarbeit  
im Studiengang Umwelttechnik

Vorgelegt von  
**Christopher, Horlitz**



21033 Hamburg  
Am 11. März 2024

- 1. Gutachter:** Prof. Dr. Timon, Kampschulte (HAW Hamburg)  
**2. Gutachter:** Master of Arts Daniel Priem

## Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis.....	IV
Abkürzungsverzeichnis .....	VI
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen.....	2
2.1 Wärmepumpe.....	2
2.1.1 Funktion Wärmepumpe.....	3
2.1.2 Luft/Wasser-Wärmepumpe .....	4
2.1.4 Betriebsweisen einer Wärmepumpe.....	5
2.1.4 Effizienz einer Wärmepumpe.....	6
2.1.5 Planung einer Luft/Wasser-Wärmepumpe .....	7
2.1.6 Messkonzept.....	10
2.2 PV-Anlage .....	10
2.2.1 Solares Strahlungsangebot.....	11
2.2.2 Aufbau einer Photovoltaikanlage.....	11
2.2.3 Performance von Photovoltaikanlagen .....	13
2.3 Speichersystem.....	14
2.3.1 Stromspeicher.....	14
2.3.2 Thermische Speicher .....	15
2.4 Betriebskosten und Förderungsmittel einer Wärmepumpe.....	16
2.5 Parameter zur Bewertung eines Gebäudes.....	18
3 Eignungsanalyse – Simulation .....	20
3.1 Methodik.....	20
3.2 Benötigte Programme und Dokumente.....	22
3.2.1 Vorstellung Simulationstool „PolySun“ .....	22
3.2.2 Benötigte Dokumente .....	22
3.3 Vorstellung ausgewähltes Gebäude.....	22
3.4 Anlagenvariante 1 – Einbau Wärmepumpe .....	27
3.5 Anlagenvariante 2 – Einbau Wärmepumpe mit PV-Anlage .....	28
3.6 Anlagenvariante 3 – Einbau Wärmepumpe mit PV-Anlage und Speichersystem.....	29
4 Auswertung der Simulation .....	30
4.1 Bewertung der Anlagenvariante 1.....	30
4.2 Bewertung der Anlagenvariante 2.....	35
4.3 Bewertung der Anlagenvariante 3.....	39

4.4 Vergleich der Varianten.....	43
5 Fazit.....	45
6 Zusammenfassung .....	46
Literaturverzeichnis.....	48
Anhang.....	51
Digitaler Anhang.....	51

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Wärmepumpenkreislauf einer Kompressionswärmepumpe (International Energy Agency, 2022: S. 19).....	3
Abbildung 2 Anlagenschema einer Luft/Wasser-Wärmepumpe als Monoblock in Innenaufstellung (Glaesmann, 2022: S. 69).....	4
Abbildung 3 Anlagenschema einer Luft/Wasser-Wärmepumpe in Split-Bauweise (Glaesmann, 2022: S. 71).....	5
Abbildung 4 Nomenklatur Wärmepumpe (Glaesmann, 2022: S. 28).....	5
Abbildung 5 Planungsschritte einer Luft/Wasser-Wärmepumpe (Sobotta, 2022: S. 83).....	7
Abbildung 6 Heizleistungsfaktoren zur überschlägigen Heizbedarfsberechnung (Sobotta, 2022: S. 84).....	8
Abbildung 7 Grafische Ermittlung des Bivalenzpunktes zweier Wärmepumpen VWL 9C und VWL 7C (Sobotta, 2022: S. 156).....	9
Abbildung 8 Messkonzept 8 der Westnetz GmbH für Wärmepumpe und PV-Erzeugungsanlage; Für Bezug der Wärmepumpe (Z1) und Haushalt (Z2) sind zwei unterschiedliche Stromlieferverträge abzuschließen (Westnetz GmbH, 2021: S. 9).....	10
Abbildung 9 Messkonzept WP3 der Stadtwerke Ratingen für Wärmepumpe mit Wärmepumpentarif (Stadtwerke Ratingen, 2021: S. 18).....	10
Abbildung 10 Die Wegverlängerung und die Veränderung der Air Mass an unterschiedlichen Tagen am Standort Berlin (vgl. Mertens, 2020: S. 43).....	11
Abbildung 11 Zusammensetzung der Globalstrahlung aus Direktstrahlung und Diffusstrahlung (Mertens, 2020: S. 44).....	11
Abbildung 12 Aufbau einer netzgekoppelten Photovoltaikanlage (Mertens, 2020: S. 201).....	12
Abbildung 13 Abweichung vom Optimum auf Einstrahlungswerte von Ausrichtung und Neigung (Konrad, 2008: S. 7).....	13
Abbildung 14 Veränderung des MPPs bei unterschiedlichen Temperaturen eines PV-Generators (Wesselak & Voswinkel, 2012: S. 84).....	14
Abbildung 15 AC-Kopplung eines Stromspeichers in einer Photovoltaikanlage (Mertens, 2020: S. 226).....	15
Abbildung 16 Thermischer Speicher mit Spiralrohr-Wärmeübertrager (Goeke, 2021: S. 123) ....	16
Abbildung 17 Auswirkung der JAZ auf den Strombedarf (Glaesmann, 2022: S. 46).....	17
Abbildung 18 Energieflüsse in einem Gebäude (Kaltschmitt, 2020: S. 194).....	19
Abbildung 19 Außenwandkonstruktionen (links: Außenseite) (Hegger, 2012: S. 106).....	20
Abbildung 20 Ausgewähltes Gebäude am Standort 25421 Pinneberg (eigene Darstellung).....	22
Abbildung 21 Grundriss Seitenansicht des Gebäudes (Roschke, 2003).....	23

Abbildung 22 Grundriss des Gebäudes. Der Anbau ist geführt unter "Essen" (Roschke, 2003)....	23
Abbildung 23 Anlagenschema des IST-Zustandes des Gebäudes (Vela Solaris, 2023 - Modifiziert)	25
Abbildung 24 Einstellung des Warmwasserbedarfs in PolySun (Vela Solaris, 2023).....	25
Abbildung 25 Einstellung des Gebäudes in PolySun (Vela Solaris, 2023).....	26
Abbildung 26 Einstellung der elektrischen Verbraucher in PolySun (Vela Solaris, 2023).....	26
Abbildung 27 Einstellungen des öffentlichen Stromnetzes (Vela Solaris, 2023).....	27
Abbildung 28 Einstellung der Heizkörper in PolySun (Vela Solaris, 2023).....	27
Abbildung 29 Anlagenschema mit Wärmepumpe und Warmwasserspeicher (Vela Solaris, 2023)	27
Abbildung 30 Einstellungen einer Wärmepumpe in PolySun (Vela Solaris, 2023).....	28
Abbildung 31 Anlagenschema Variante 2 Wärmepumpe mit PV-Anlage und Stromspeicher (Vela Solaris, 2023).....	29
Abbildung 32 Anlagenschema Wärmepumpe mit PV-System und Pufferspeicher (Vela Solaris, 2023).....	30
Abbildung 33 Veränderung des Energiedefizits bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen und Soll-Raumtemperaturen (eigene Darstellung).....	32
Abbildung 34 Veränderung des Energiebedarfs bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen und Soll-Raumtemperaturen (eigene Darstellung).....	33
Abbildung 35 Stromverbrauch in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur und Soll-Raumtemperatur (eigene Darstellung).....	33
Abbildung 36 Entwicklung der Stromkosten in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur und Soll-Raumtemperatur bei aktuellem Haushaltsstrompreis von 42,26 Cent/kWh (eigene Darstellung)	34
Abbildung 37 Entwicklung der Betriebskosten in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur und Soll-Raumtemperatur bei aktuellem Wärmepumpentarif von 22,00 Cent/kWh (eigene Darstellung)	35
Abbildung 38 Verlauf der Speicherladezustandst einer Fenecon B-Box 7.5 mit einer Speicherkapazität von 7,5 kWh im Zeitraum 20. bis 27. August (Vela Solaris, 2023).....	36
Abbildung 39 Verlauf des Speicherladezustands einer Fenecon B-Box 10.0 mit einer Speicherkapazität von 10 kWh im Zeitraum 20. bis 27. August (Vela Solaris, 2023).....	37
Abbildung 40 Entwicklung des Autarkiegrads innerhalb eines Jahres für jeden Monat (Vela Solaris, 2023).....	37
Abbildung 41 Verlauf des Autarkiegrades einer Woche im Dezember (Vela Solaris, 2023).....	38
Abbildung 42 Betriebskosten der ausgewählten Wärmepumpen bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 20°C und 25°C. Berechnet mit Wärmepumpentarif 22 Cent/kWh (eigene Darstellung).....	38
Abbildung 43 System-Jahresarbeitszahlen der simulierten Wärmepumpen bei unterschiedlichen Pufferspeichergrößen bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 20°C (eigene Darstellung).....	41
Abbildung 44 Entwicklung der System-Jahresarbeitszahl bei Wärmepumpe Stiebel Eltron WPL 23 E in Abhängigkeit der Raum- und Vorlauftemperatur und Pufferspeichergröße (eigene Darstellung).....	42
Abbildung 45 Betriebskosten der Wärmepumpen mit Photovoltaik, Stromspeicher und Pufferspeicher mit 500 Liter Volumen bei Soll-Raumtemperatur 20°C und 25°C bei Wärmepumpentarif 0,22 €/kWh (eigene Darstellung).....	42
Abbildung 46 Bivalenzpunktbestimmung (Stiebel Eltron, o.J.).....	55

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Optimierungsmöglichkeiten um den Betrieb einer Wärmepumpe effizienter zu gestalten (vgl. Glaesmann, 2022: S. 246f, 181, 222) .....	7
Tabelle 2 Förderungsmittel Heizungsaustausch (vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2024) .....	18
Tabelle 3 Wärmeleitfähigkeiten gängiger Baustoffe für die Gebäudehülle (vgl. Hegger, 2012: S. 136, 29; vgl. Laasch & Laasch, 2013: S. 499) .....	19
Tabelle 4 Brennstoffverbrauch der Jahre 2020 bis 2022 (eigene Darstellung) .....	23
Tabelle 5 Stromverbrauch der Jahre 2020 bis 2022 (eigene Darstellung).....	24
Tabelle 6 Leistungsangaben der ausgewählten Wärmepumpen (Vela Solaris, 2023).....	28
Tabelle 7 Ausgewählter Speicher und dessen Kapazität mit Batteriewechselrichter SMA Sunny Boy Storage 5.0-10 (Vela Solaris, 2023) .....	29
Tabelle 8 Ausgewählte Speicher mit deren Speichervolumen (Vela Solaris, 2023) .....	30
Tabelle 9 Thermische Ergebnisse bei Vorlauftemperatur 50°C.....	31
Tabelle 10 Thermische Ergebnisse bei Vorlauftemperatur 55°C.....	31
Tabelle 11 Thermische Ergebnisse bei Vorlauftemperatur 60°C.....	31
Tabelle 12 Thermische Ergebnisse bei Vorlauftemperatur 50°C.....	31
Tabelle 13 Thermische Ergebnisse bei Vorlauftemperatur 55°C.....	31
Tabelle 14 Thermische Ergebnisse bei Vorlauftemperatur 60°C.....	32
Tabelle 15 Ergebnisse der Photovoltaikanlage bei verschiedenen Stromspeicherkapazitäten mit Wärmepumpe Stiebel Eltron WPL 23 E bei einem PV-Jahresertrag (AC) von 5413,5 kWh (eigene Darstellung).....	35
Tabelle 16 Thermische Ergebnisse der Stiebel Eltron WPL 23 E bei unterschiedlichen Pufferspeichergößen und Vorlauftemperatur 50°C (eigene Darstellung).....	39
Tabelle 17 Thermische Ergebnisse der Stiebel Eltron WPL 23 E bei unterschiedlichen Pufferspeichergößen und Vorlauftemperatur 55°C (eigene Darstellung).....	39
Tabelle 18 Thermische Ergebnisse der Stiebel Eltron WPL 23 E bei unterschiedlichen Pufferspeichergößen und Vorlauftemperatur 60°C (eigene Darstellung).....	39
Tabelle 19 Thermische Ergebnisse der Stiebel Eltron WPL 23 E bei unterschiedlichen Pufferspeichergößen und Vorlauftemperatur 50°C (eigene Darstellung).....	40
Tabelle 20 Thermische Ergebnisse der Stiebel Eltron WPL 23 E bei unterschiedlichen Pufferspeichergößen und Vorlauftemperatur 55°C (eigene Darstellung).....	40
Tabelle 21 Thermische Ergebnisse der Stiebel Eltron WPL 23 E bei unterschiedlichen Pufferspeichergößen und Vorlauftemperatur 60°C (eigene Darstellung).....	40
Tabelle 22 Vergleich der Betriebskosten über alle Anlagenvarianten bei Soll-Raumtemperatur (ST) 20°C und 25°C bei Wärmepumpentarif 0,22 €/kWh. Niedrigster Wert in grün, höhere in rot (eigene Darstellung) .....	43
Tabelle 23 Vergleich der Betriebskosten über alle Anlagenvarianten bei Soll-Raumtemperatur (ST) 20°C und 25°C bei Haushaltsstromtarif 0,4226 €/kWh (eigene Darstellung) .....	44
Tabelle 24 Amortisationszeit der Anlagenvarianten ohne Förderung. Hohe Amortisationszeit in Rot, niedrige in Grün bei Wärmepumpentarif 0,22 €/kWh (eigene Darstellung) .....	44
Tabelle 25 Ergebnistabelle Brötje BLZ Split 16 bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 20°C (eigene Darstellung).....	56
Tabelle 26 Ergebnistabelle Buderus WPL 110 I bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 20°C (eigene Darstellung).....	56

Tabelle 27 Ergebnistabelle Stiebel Eltron WPL 23 E bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 25°C (eigene Darstellung).....	56
Tabelle 28 Ergebnistabelle Brötje BLW Split 16 bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 25°C (eigene Darstellung).....	57
Tabelle 29 Ergebnistabelle Buderus WPL 110 I bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 25°C (eigene Darstellung).....	57
Tabelle 30 Ergebnistabelle Brötje BLW Split 16 bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 20°C (eigene Darstellung).....	57
Tabelle 31 Ergebnistabelle Brötje BLW Split 16 bei Vorlauftemperatur 55°C und Soll-Raumtemperatur 20°C (eigene Darstellung).....	58
Tabelle 32 Ergebnistabelle Brötje BLW Split 16 bei Vorlauftemperatur 60°C und Soll-Raumtemperatur 20°C (eigene Darstellung).....	58
Tabelle 33 Ergebnistabelle Brötje BLW Split 16 bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 25°C (eigene Darstellung).....	58
Tabelle 34 Ergebnistabelle Brötje BLW Split 16 bei Vorlauftemperatur 55°C und Soll-Raumtemperatur 25°C (eigene Darstellung).....	58
Tabelle 35 Ergebnistabelle Brötje BLW Split 16 bei Vorlauftemperatur 60°C und Soll-Raumtemperatur 25°C (eigene Darstellung).....	59
Tabelle 36 Ergebnistabelle Heliotherm HP12L-K-BC bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 20°C (eigene Darstellung).....	59
Tabelle 37 Ergebnistabelle Heliotherm HP12L-K-BC bei Vorlauftemperatur 55°C und Soll-Raumtemperatur 20°C (eigene Darstellung).....	59
Tabelle 38 Ergebnistabelle Heliotherm HP12L-K-BC bei Vorlauftemperatur 60°C und Soll-Raumtemperatur 20°C (eigene Darstellung).....	60
Tabelle 39 Ergebnistabelle Heliotherm HP12L-K-BC bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 25°C (eigene Darstellung).....	60
Tabelle 40 Ergebnistabelle Heliotherm HP12L-K-BC bei Vorlauftemperatur 55°C und Soll-Raumtemperatur 25°C (eigene Darstellung).....	60
Tabelle 41 Ergebnistabelle Heliotherm HP12L-K-BC bei Vorlauftemperatur 60°C und Soll-Raumtemperatur 25°C (eigene Darstellung).....	60

## Abkürzungsverzeichnis

BWP – Bundesverband Wärmepumpe

GEG – Gebäudeenergiegesetz

COP – Coefficient of Performance

SJAZ – Systemjahresarbeitszahl

ZP – Zählerplatz

PV – Photovoltaik

WW – Warmwasser

KfW – Kreditanstalt für Wiederaufbau

Bafa – Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle

BMWK – Bundesamt für Wirtschaft und Klimaschutz

AM – Air Mass

# 1 Einleitung

Vor dem Hintergrund des Klimawandels, muss die Verwendung fossiler Brennstoffe wie z.B. von Gas und Öl eingeschränkt werden. Ebenfalls hat der Überfall Russlands auf die Ukraine im Jahr 2022 aufgezeigt, dass eine Abhängigkeit von fossilen Energieträgern nicht zukunftsfähig ist. Deutschland hat im Jahr 2020 und 2021 65% seines Energiebedarfs mit Gas aus Russland gedeckt (vgl. Statista, 2023). Einen der Sektoren mit dem höchsten Endenergieverbrauch stellt mit 31,8% im Jahr 2021 der Gebäudesektor dar (vgl. Umweltbundesamt, 2023). Vor allem im Gebäudebestand ist der Anteil an fossilen Energieträgern (Gas und Öl) besonders hoch (vgl. Deutsche Energie-Agentur, 2023). Die Bundesregierung hat sich mit der Änderung des Klimaschutzgesetzes dazu verpflichtet bis zum Jahr 2045 Treibhausgasneutral zu werden und bereits bis Jahr 2030 seine Emissionen um 65% gegenüber 1990 zu senken (vgl. Bundesregierung, 2022).

Um dieses Ziel zu erreichen ist es notwendig den Anteil fossiler Energieträger im Gebäudesektor stark zu reduzieren. Erreicht werden kann dies mit dem Einbau von Wärmepumpen. Da Wärmepumpen für ihren Betrieb nur Strom benötigen, ist es möglich diese klimaneutral zu betreiben, solange der Strombezug aus regenerativen Energien stammt. Gebäudeeigentümer können mit dem Einbau einer Wärmepumpe unterschiedliche Ziele verfolgen. Einige verfolgen das Ziel unabhängiger von fossilen Energieträgern zu werden. Anderen Eigentümern sind wirtschaftliche Gründe wichtiger und hoffen mit dem Einbau einer Wärmepumpe ihre Heizkosten zu verringern. Ein weiteres Ziel stellt die Umweltfreundlichkeit dar. Hier ist den Eigentümern wichtig möglichst wenig CO<sub>2</sub>-Emissionen zu emittieren.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll die konventionelle Heizungsanlage eines Bestandsgebäudes durch eine Wärmepumpe ersetzt werden ohne Änderungen an der Gebäudehülle vorzunehmen.

Eine Wärmepumpe kann zusätzlich mit weiteren Anlagenkomponenten wie z.B. einer PV-Anlage, Stromspeicher oder Pufferspeicher kombiniert werden. Mithilfe des Simulationstools „PolySun“ sollen verschiedenste Anlagenkonstellationen wie bspw. Wärmepumpe in Kombination mit einer PV-Anlage oder Wärmepumpe mit PV-Anlage und Pufferspeicher simuliert werden. Es soll untersucht werden, ob sich der Einbau einer Wärmepumpe in einem Bestandsgebäude ohne weitere Sanierungsmaßnahmen für den Gebäudeeigentümer rechnet.

Konkret sollen dazu zwei Leitfragen betrachtet werden:

1. Welche Häuser kommen für die Installation einer Wärmepumpe in Frage?
2. Ist es aus technischer und wirtschaftlicher Sichtweise sinnvoll eine Wärmepumpe mit einer Photovoltaikanlage zu betreiben?

In dieser Bachelorarbeit werden zunächst die nötigen Grundlagen zu Wärmepumpen, Photovoltaikanlagen und Speichersystemen (thermisch und elektrisch) dargelegt. Im weiteren Schritt erfolgt die Darstellung der Methodik, die Vorstellung des Simulationstools „PolySun“ und eine anschließende Auswertung der Ergebnisse.



## 2 Grundlagen

Im Folgenden werden die Grundlagen der Wärmepumpe, der Photovoltaik, elektrischer und thermischer Speichersysteme, der Betriebskosten und Fördermittel einer Wärmepumpe und die Parameter zur Bewertung eines Gebäudes beschrieben.

### 2.1 Wärmepumpe

Wärmepumpen sind mechanisch oder elektrisch betriebene Pumpen, mit denen Temperaturquellen aus einem niedrigen Temperaturniveau auf ein höheres Niveau angehoben und dieses erzeugte hohe Temperaturniveau zum Heizen oder zum Erhitzen von Warmwasser genutzt werden kann (vgl. Quaschnig, 2015: S. 356). Wärmepumpen gibt es in unterschiedlichen Funktionsweisen wie z.B. Kompressions-Wärmepumpen, Absorptionswärmepumpen und Adsorptionswärmepumpen. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird sich jedoch nur auf die Kompressions-Wärmepumpe beschränkt, da diese aktuell vorrangig im Gebäudesektor verbaut werden (vgl. Wietschel, 2015: S. 384). Die anderen beiden Funktionsweisen benötigen hingegen noch eine zusätzliche Wärmezufuhr im Verdichter, welche meist noch durch Erdgas gedeckt wird (vgl. Quaschnig, 2015: S. 356-360; vgl. Wietschel, 2015: S. 385).

Unter den Wärmepumpen gibt es verschiedene nutzbare Wärmequellen (vgl. Wietschel, 2015: S. 384):

- Sole/Wasser-Wärmepumpe: Wärmeentzug erfolgt über Erdwärme
- Wasser/Wasser-Wärmepumpe: Wärmeentzug erfolgt über Grundwasser
- Luft/Wasser-Wärmepumpe: Wärmeentzug erfolgt über Außenluft
- Luft/Luft-Wärmepumpe: Wärmeentzug ebenfalls über Außenluft, Wärmeverteilung jedoch über Luft anstatt Wasser

Beschränkt wird sich im Rahmen dieser Bachelorarbeit auf die Luft/Wasser-Wärmepumpe, da diese gegenüber den anderen Varianten gewisse Vorteile hat, welche im Folgenden kurz erläutert werden (vgl. International Energy Agency, 2022: S. 20; Wietschel, 2015: S. 68, 77, 79, 82):

- Unbeschränkte Verfügbarkeit an Außenluft
- Gute Erschließung: Es muss nur ein Außengerät installiert werden. Sole/Wasser und Wasser/Wasser haben hohe Installationskosten (bspw. Erdsonde). Es besteht Genehmigungspflicht bei tiefen Erdbohrungen oder Nutzung von Grundwasser. Erdkollektoren benötigen eine große Fläche.
- Keine Genehmigung notwendig. Lediglich die Schallemissionen müssen beachtet werden. Nach TA Lärm Absatz 6 darf in reinen Wohngebieten tagsüber eine Schallemission von 50 dB und nachts 35 dB nicht überschritten werden.

## 2.1.1 Funktion Wärmepumpe

In der folgenden Abbildung 1 ist der Wärmepumpenkreislauf dargestellt.

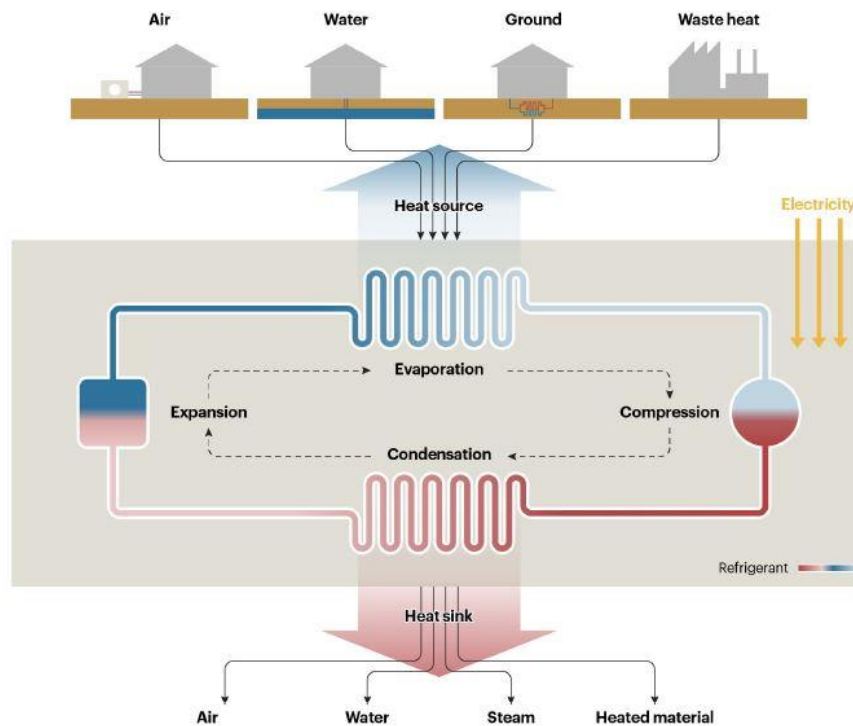


Abbildung 1 Wärmepumpenkreislauf einer Kompressionswärmepumpe (International Energy Agency, 2022: S. 19)

Im Wesentlichen besteht eine Kompressionswärmepumpe aus zwei Wärmetauschern (Verdampfer und Verflüssiger), einem Kompressor bzw. Verdichter und einem Expansionsventil (vgl. Wang et al., 2021: S. 3). Verwendet wird innerhalb des Kreislaufes ein sogenanntes Kältemittel. Die besondere Eigenschaft eines Kältemittels stellt der niedrige Siedepunkt dar, welcher bei unter  $0^{\circ}\text{C}$  liegt. Verwendet werden teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW) wie z.B. R410A und R134a, welche jedoch stark zum Treibhausgaseffekt beitragen. Um hier den Umweltschutz weiter voranzutreiben, werden alternative Kältemittel wie R290 (Propan) oder R600a (Isobutan) verwendet, welche nur einen geringen Beitrag zum Treibhauseffekt leisten (vgl. Glaesmann, 2022: S. 98, 102).

Das Kältemittel hat die Aufgabe, die Wärmeenergie aus der Temperaturquelle (siehe Heat source, Abb. 1) zu entziehen. Durch die Aufnahme der Wärmeenergie verändert das Kältemittel, aufgrund seines niedrigen Siedepunkts, seinen Aggregatzustand im Verdampfer (siehe Evaporation, Abb. 1) von flüssig zu gasförmig (vgl. Glaesmann, 2022: S. 90-93; vgl. Wang et al., 2021: S. 3f). Der Druck und das Temperaturniveau des nun gasförmigen Kältemittels wird durch einen elektrisch angetriebenen Kompressor (siehe Compression, Abb. 1), auch Verdichter genannt, erhöht. Im Anschluss wird das gasförmige Kältemittel, mit dem im Verdichter erhöhten Temperaturniveau, durch den Verflüssiger (siehe Condensation, Abb. 1) geleitet und kann hier seine Wärmeenergie an die entsprechende Wärmesenke (siehe Heat sink, Abb. 1) abgeben (vgl. Glaesmann, 2022: S. 90-93; vgl. Wang et al., 2021: S. 3f). Im Verflüssiger wechselt das Kältemittel durch die Wärmeabgabe erneut seinen Aggregatzustand von gasförmig zu flüssig, dass jedoch noch unter hohem Druck und hoher Temperatur steht. Um das Kältemittel in seinen Ursprungszustand zu versetzen, wird das Kältemittel durch ein Expansionsventil (siehe Expansion, Abb. 1) geleitet. Die Expansion des Kältemittels hat zur Folge, dass das Temperaturniveau und der Druck auf seinen

Ursprungszustand absinken. Das Kältemittel ist nun bereit erneut Wärmeenergie aufzunehmen und den Zyklus erneut durchzuführen (vgl. Glaesmann, 2022: S. 90-93; vgl. Wang et al., 2021: S. 3f).

### 2.1.2 Luft/Wasser-Wärmepumpe

Die Installation einer Luft/Wasser-Wärmepumpe in einem Gebäude ist auf zwei Arten möglich. Eine Installationsart stellt die Kompaktbauweise mithilfe von Monoblock-Wärmepumpen dar. Bei Monoblock-Wärmepumpen befindet sich der gesamte Kältekreis in einem Gerät. Die Monoblock-Wärmepumpe kann sowohl im Innenbereich als auch im Außenbereich installiert werden (vgl. Glaesmann, 2022: S. 69).

In Abbildung 2 ist ein Anlagenschema einer Luft/Wasser-Wärmepumpe als Monoblock im Innenbereich dargestellt.

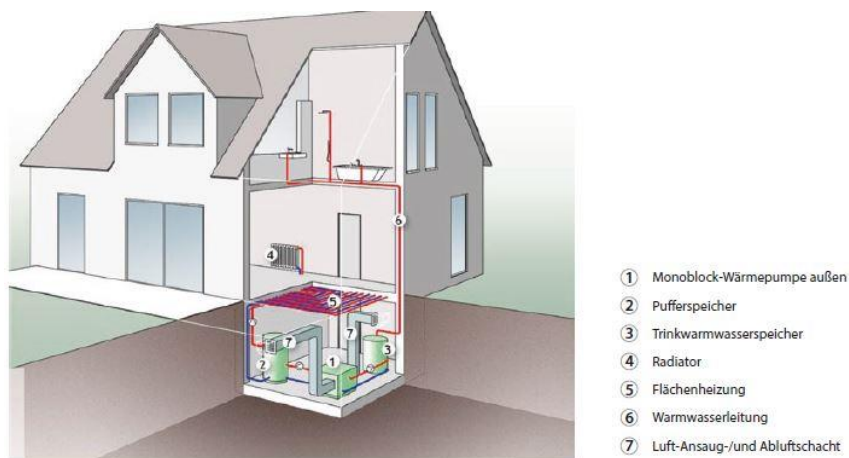


Abbildung 2 Anlagenschema einer Luft/Wasser-Wärmepumpe als Monoblock in Innenaufstellung (Glaesmann, 2022: S. 69)

Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung der Split-Bauweise. Der Kältekreislauf der Wärmepumpe wird hier in ein Innengehäuse und in ein Außengehäuse aufgeteilt. Das Außengehäuse wird dabei außerhalb des Gebäudes installiert (vgl. Glaesmann, 2022: S. 70). Im Außengerät befindet sich der Ventilator zum Ansaugen der Luft, der Verdampfer und je nach Hersteller der Verdichter. Im Innengehäuse befindet sich der Verflüssiger. Die Split-Bauweise eignet sich aufgrund ihrer Flexibilität gut für den Gebäudebestand und vermeidet die Installation von Lüftungskanälen (siehe z.B. Abb. 2 Nr. 7). Zur Installation und Inbetriebnahme einer Split-Anlage ist nach der Chemischen-Klimaschutzverordnung Paragraph 5 jedoch nur zertifiziertes Fachpersonal befugt aufgrund des Kältemittels in den Verbindungsleitungen (vgl. Glaesmann, 2022: S. 70).

In Abbildung 3 ist ein Anlagenschema nach Split-Bauweise dargestellt.

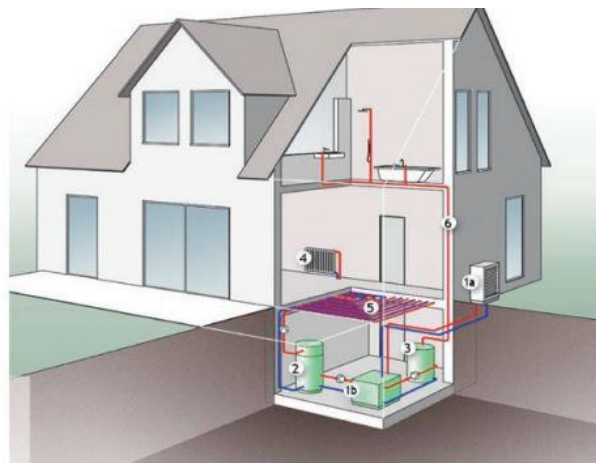


Abbildung 3 Anlagenschema einer Luft/Wasser-Wärmepumpe in Split-Bauweise (Glaesmann, 2022: S. 71)

Damit Wärmepumpen unterschiedlicher Hersteller miteinander verglichen werden können, wurde eine Nomenklatur für Wärmepumpen eingeführt. Hersteller geben die Leistungen ihrer Wärmepumpen deshalb nach standardisierten Betriebspunkten an. Die Prüfbedingungen sind in der Norm EN 14511 aufgeführt (vgl. Glaesmann, 2022: S. 28; vgl. Quaschnig, 2015: S. 362).

In Abbildung 4 ist die Nomenklatur für Wärmepumpen dargestellt. Eine Luft/Wasser-Wärmepumpe eines beliebigen Herstellers kann z.B. als A2W35 mit einem Coefficient of Performance (COP) von 3,0 deklariert sein. Das bedeutet, die Wärmepumpe erzeugt bei einer Außentemperatur von 2°C und einer Vorlauftemperatur von 35°C aus 1 kWh Strom 3 kWh Heizwärme.

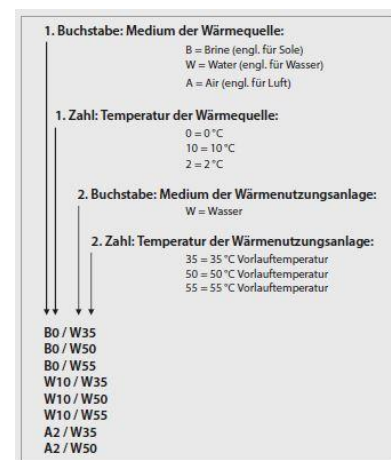


Abbildung 4 Nomenklatur Wärmepumpe (Glaesmann, 2022: S. 28)

#### 2.1.4 Betriebsweisen einer Wärmepumpe

Eine Wärmepumpe kann in unterschiedlichen Betriebsweisen betrieben werden (vgl. Sobotta, 2022: S. 79). Sie kann bspw. im sogenannten monovalenten Betrieb arbeiten, bei dem Heizung und Warmwasser nur durch die Wärmepumpe abgedeckt wird. Diese Betriebsweise ist für Anlagen geeignet deren notwendige Vorlauftemperatur nicht die maximale Vorlauftemperatur der Wärmepumpe überschreitet (vgl. Glaesmann, 2022: 108). Für Luft/Wasser-Wärmepumpen wird diese Betriebsweise eher nicht verwendet, da die Wärmepumpe für den gesamten Jahresbedarf ausgelegt werden muss und gerade Luft/Wasser-Wärmepumpen bei niedrigen Außentemperaturen den Wärmebedarf nicht mehr alleine decken können (vgl. Glaesmann, 2022: S. 67, 108).

Bei der monoenergetischen Betriebsweise hingegen wird die Wärmepumpe durch einen zusätzlichen Wärmeerzeuger mit demselben Energieträger (in dem Fall Strom) unterstützt (vgl. Sobotta, 2022: S. 79). Als zusätzlicher Wärmeerzeuger dient ein Elektroheizstab, welcher Spitzenlasten bei hohen Wärmeanforderungen abdecken soll. Vor allem Luft/Wasser-Wärmepumpen werden aufgrund ihrer schlechten Effizienz bei niedrigen Außentemperaturen mit dieser Betriebsweise betrieben (vgl. Glaesmann, 2022: S. 110).

Eine weitere mögliche Betriebsweise ist der bivalente alternative Betrieb. Wie bei dem monoenergetischen Betrieb wird die Wärmepumpe durch einen weiteren Wärmeerzeuger unterstützt. Der wesentliche Unterschied ist, dass der zusätzliche Wärmeerzeuger einen anderen Energieträger nutzt als die Wärmepumpe z.B. Erdgas (vgl. Glaesmann, 2022: S. 109; vgl. Sobotta, 2022: S. 80). Im bivalenten alternativen Betrieb übernimmt der zusätzliche Wärmeerzeuger bei Unterschreiten einer eingestellten Quellentemperatur die Wärmeerzeugung komplett und die Wärmepumpe schaltet ab. Der Punkt, an dem der zusätzliche Wärmeerzeuger übernimmt, wird Bivalenzpunkt genannt und kann z.B. bei 0°C Außentemperatur bei einer Luft/Wasser-Wärmepumpe eingestellt werden (vgl. Glaesmann, 2022: S. 109; vgl. Sobotta, 2022: S. 80).

Die beiden Wärmeerzeuger, wie im bivalenten alternativen Betrieb erläutert, lassen sich auch parallel betreiben (vgl. Glaesmann, 2022: S. 109; vgl. Sobotta, 2022: S. 80). Diese Betriebsweise wird dann bivalenter paralleler Betrieb genannt. Hier schaltet sich der zusätzliche Wärmeerzeuger bei Unterschreiten des eingestellten Bivalenzpunkts dazu, sodass Wärmepumpe und zusätzlicher Wärmeerzeuger gleichzeitig in Betrieb sind. Vorausgesetzt wird, dass die Wärmepumpe bis zur tiefsten Außentemperatur in Betrieb bleiben kann (vgl. Glaesmann, 2022: S. 109; vgl. Sobotta, 2022: S. 80).

Als Standard sollte eine der Mono-Betriebsweisen gewählt werden, um zusätzliche Investitionskosten durch den zweiten Wärmeerzeuger für den bivalenten Betrieb zu vermeiden. Die bivalente Betriebsweise kann von Vorteil sein, wenn die Heizungsanlage im Bestand noch weiter genutzt werden kann (vgl. Glaesmann, 2022: S. 109; vgl. Sobotta, 2022: S. 80).

#### 2.1.4 Effizienz einer Wärmepumpe

Die Effizienz einer Wärmepumpe wird anhand zweier Kennzahlen, der Leistungszahl bzw. Coefficient of Performance (COP) und der Jahresarbeitszahl, bemessen. Die folgende Gleichung (1) stellt die Berechnung der Leistungszahl  $\varepsilon$  dar. Sie ist der Quotient des abgeführten Wärmestroms  $\dot{Q}_{ab}$  und der zugeführten elektrischen Leistung  $P$  (vgl. Quaschnig, 2015: S. 361).

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{ab}}{P} \quad (1)$$

Aus der idealen Leistungszahl  $\varepsilon_c$  geht hervor, dass die Leistungszahl bzw. Effizienz einer Wärmepumpe am größten ist, wenn die Wärmequelle  $T_{zu}$  (z.B. Außenluft) ein hohes Temperaturniveau hat oder die Vorlauftemperatur  $T_{ab}$  möglichst klein ist. Folglich bedeutet dies, je kleiner die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Vorlauftemperatur ist, desto besser ist die Leistungszahl. In Gleichung (2) ist dies dargestellt (vgl. Quaschnig, 2015: S. 361).

$$\varepsilon_c = \frac{T_{ab}}{T_{ab} - T_{zu}} \quad (2)$$

Die Jahresarbeitszahl (JAZ) beschreibt die Messung der Effizienz einer Wärmepumpe über den Zeitraum eines Jahres. Berücksichtigt werden dabei die abgegebene Heizwärme und die aufgewendete Antriebsenergie. Das besondere an der Jahresarbeitszahl ist, dass sie eine gute Kennzahl für den realen Betrieb der Wärmepumpe ist. Neben der Antriebsenergie des Verdichters werden auch die Antriebsenergie zum Betrieb der zur Wärmepumpe zugehörigen Komponenten wie z.B. Pumpen, Ventilatoren, Steuerung und Regelung bei tages- und jahreszeitlichen Schwankungen berücksichtigt. Typische Jahresarbeitszahlen für L/W-Wärmepumpen betragen zwischen 2,5 und 3,5 (vgl. Glaesmann, 2022: S. 30, 32; vgl. Kaltschmitt, 2020: S. 712). Die Gleichung (3) stellt die Berechnung der Jahresarbeitszahl dar.

$$JAZ = \frac{\text{Heizwärme [kWh/a]}}{\text{Antriebsenergie (Strom) [kWh/a]}} \quad (3)$$

Um den Betrieb der Wärmepumpe weiter zu optimieren, können folgende Möglichkeiten nach Tabelle 1 berücksichtigt werden.

Tabelle 1 Optimierungsmöglichkeiten um den Betrieb einer Wärmepumpe effizienter zu gestalten (vgl. Glaesmann, 2022: S. 246f, 181, 222)

Optimierungsmöglichkeit	Beschreibung
Hydraulischen Abgleich durchführen	Optimale Einstellung der Volumenströme an den Heizkörpern
Nutzerverhalten anpassen	Max. Raumtemperatur an untere Behaglichkeitsgrenze anpassen, kein Dauerlüften
Einbindung eines Pufferspeichers	Zur Zwischenspeicherung von erzeugter Wärmeenergie
Einbau einer Photovoltaikanlage	Reduzierung des Netzbezugs, PV produziert Strom für die Wärmepumpe
Vergrößerung der Heizfläche durch Austausch Heizkörper	Senkung der Vorlauftemperatur
Sanierung der Gebäudehülle	Gebäudehülle dämmen; Fenster sanieren, um Wärmeverluste zu reduzieren

### 2.1.5 Planung einer Luft/Wasser-Wärmepumpe

Zur Planung einer Luft/Wasser-Wärmepumpe gehören mehrere Schritte, welche in der folgenden Abbildung 5 dargestellt sind.

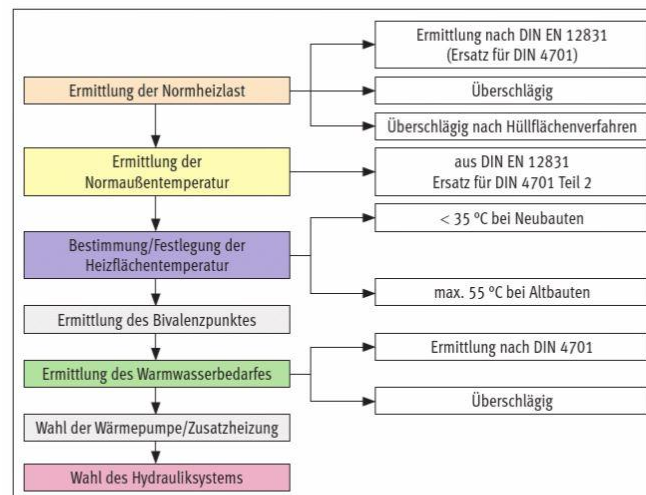


Abbildung 5 Planungsschritte einer Luft/Wasser-Wärmepumpe (Sobotta, 2022: S. 83)

An erster Stelle steht die Ermittlung des Heizbedarfs des Gebäudes und die Bestimmung der Norm-Außentemperatur am Gebäudestandort. Der Heizbedarf des Gebäudes wird benötigt, um die Leistung der Wärmepumpe zu bestimmen. Die genaue Berechnung des Heizbedarfs erfolgt nach der Norm DIN EN 12831 „Heizungsanlagen in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast“. Auf diese Art der Berechnung wird im Rahmen dieser Bachelorarbeit jedoch aufgrund des hohen Aufwands verzichtet. Stattdessen wird der Heizbedarf überschlägig nach Folgender Gleichung (4) bestimmt (vgl. Sobotta, 2022: S. 83f):

$$\text{Überschlägige Heizleistung (W)} = \text{Heizfläche (m}^2\text{)} \cdot \text{Heizleistungsfaktor } \left(\frac{W}{m^2}\right) \quad (4)$$

Die Werte für den Heizleistungsfaktor können aus Folgender Abbildung 6 entnommen werden.

Haustyp	Dämmung/Fenster	spezifische Heizlast
Hausbestand	Nein/Doppelverglasung	100 W/m <sup>2</sup>
Hausbestand	Ja/Doppelverglasung	80 W/m <sup>2</sup>
Hausbestand, WSchV 95	Ja/Doppelverglasung	50 – 70 W/m <sup>2</sup>
Neubau EnEV 2002/2007	Ja/Isolierverglasung	35 – 45 W/m <sup>2</sup>
Niedrigenergiehaus (KfW 40)	Ja/Isolierverglasung	15 – 25 W/m <sup>2</sup>
Passivhaus	Ja/Dreifachverglasung	10 – 15 W/m <sup>2</sup>

Abbildung 6 Heizleistungsfaktoren zur überschlägigen Heizbedarfsberechnung (Sobotta, 2022: S. 84)

Die Norm-Außentemperatur ist die tiefste Temperatur, die am Gebäudestandort auftreten kann und wird für die Wahl der Wärmepumpe benötigt. Bestimmt wird sie nach Norm DIN EN 12831-1. Der Bundesverband Wärmepumpe e.V. (BWP) hat eine Klimakarte veröffentlicht, welche die Norm-Außentemperatur nach DIN EN 12831-1 visualisiert (Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V., o.J.; vgl. Sobotta, 2022: S. 84). Das in dieser Bachelorarbeit verwendete Simulationstool PolySun hat ebenfalls die Möglichkeit die Norm-Außentemperatur automatisch zu bestimmen (Vela Solaris, 2023).

Die Festlegung der Heizflächentemperatur bzw. der benötigten Vorlauftemperatur kann auf verschiedene Arten erfolgen. Eine Möglichkeit ist die Wärmebedarfsberechnung für jeden einzelnen Raum nach DIN EN 12831. Mit dem berechneten Heizlastbedarf des Raumes kann anschließend ein passender Heizkörper, der den Heizlastbedarf abdeckt, ausgewählt werden. Die Wärmeleistung, die Heizkörper bei bestimmten Vorlauftemperaturen abgeben können, wird von den Herstellern üblicherweise im Datenblatt unter den technischen Daten angegeben (vgl. Glaesmann, 2022: S. 219). Eine weitere Möglichkeit ist die experimentelle Bestimmung der Vorlauftemperatur. Dabei werden während der Heizperiode die Heizkörper am Thermostatventil vollständig geöffnet und die eingestellte Vorlauftemperatur schrittweise abgesenkt bis eine Raumtemperatur von 20°C bis 22°C eingehalten wird. Alternativ kann an einem kalten Wintertag eine maximale Vorlauftemperatur von 50°C eingestellt werden. Sollten bei komplett geöffneten Heizkörpern die Räume ausreichend warm werden, ist dies ein gutes Indiz für einen effizienten Betrieb einer Wärmepumpe (vgl. Glaesmann, 2022: 219).

Die Bestimmung vom Bivalenzpunkt stellt einen weiteren wichtigen Schritt bei der Auslegung einer Luft/Wasser-Wärmepumpe dar. Wie der Bivalenzpunkt grafisch bestimmt werden kann erfolgt nach einem Beispiel für ein Einfamilienhaus mit einer zu beheizenden Fläche von 150m<sup>2</sup>, einer Norm-Heizlast von 7,1 kW, einer Norm-Außentemperatur von -14°C und einer Fußbodenheizung mit einer Vorlauftemperatur von 35°C. Benötigt werden außerdem die Leistungskurven ausgewählter Wärmepumpen (Sobotta, 2022: S. 155f).

In Abbildung 7 ist die grafische Ermittlung des Bivalenzpunktes anhand zweier Wärmepumpen (VWL 9C und VWL 7C) dargestellt.

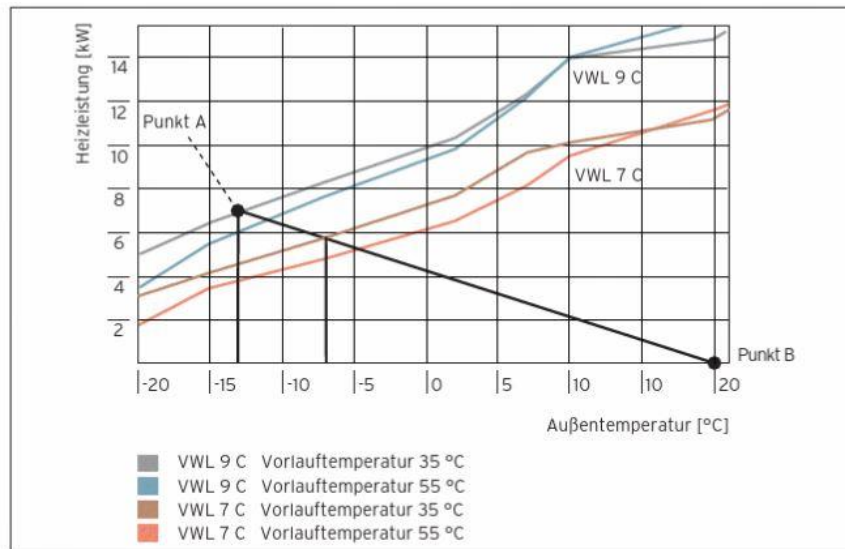


Abbildung 7 Grafische Ermittlung des Bivalenzpunktes zweier Wärmepumpen VWL 9C und VWL 7C (Sobotta, 2022: S. 156)

Punkt A stellt dabei die Norm-Heizlast in Abhängigkeit der Norm-Außentemperatur dar. Als Punkt B wird die gewählte Raumtemperatur als Außentemperatur eingetragen. Die Gerade zwischen Punkt A und B stellt anschließend den vereinfachten Wärmebedarf des Gebäudes dar (vgl. Sobotta, 2022: S. 155). Die Leistungskurve der Wärmepumpe VWL 7C hat ihren Schnittpunkt bzw. Bivalenzpunkt mit der Gerade AB bei der Außentemperatur von  $-8,5^{\circ}\text{C}$ . Bei noch niedrigeren Temperaturen kann der Heizbedarf von dieser Wärmepumpe nicht mehr gedeckt werden und es muss sich eine Zusatzheizung dazuschalten (bspw. Heizstab). Die Wärmepumpe VWL 9C kann auch bei der tiefsten Außentemperatur den Heizbedarf des Gebäudes decken und monovalent betrieben werden (vgl. Sobotta, 2022: S. 156).

Da die Wärmepumpe ebenfalls für die Bereitstellung von Warmwasser zuständig ist und dies zusätzlich Energie benötigt, muss der Warmwasserbedarf als Zusatzleistung bestimmt werden und mit der Heizlast des Gebäudes addiert werden. Abgeschätzt werden kann diese Zusatzleistung mit  $0,22 - 0,44 \text{ kW}$  bei einem normalen Bedarf von  $30 - 60 \frac{\text{Liter}}{\text{Tag}}$  pro Person (vgl. Glaesmann, 2022: S. 127). Die Addition der Zusatzleistung durch Warmwasser birgt jedoch auch die Gefahr der Überdimensionierung der Wärmepumpe, welche häufiges Takten und den daraus resultierenden höheren Stromverbrauch zur Folge hätte. Empfohlen wird den Warmwasserzuschlag erst ab 20% der Gebäudeheizlast zu berücksichtigen. Die Gefahr der Überdimensionierung besteht besonders bei Gebäuden mit einer guten Gebäudehülle, da so die Heizlast des Gebäudes verringert wird und der Zuschlag zur Warmwasserbereitung einen größeren Anteil an der Gesamtheizlast bekommt. Zum Schutz vor Legionellen sollte die Warmwassertemperatur zwischen  $50 - 55^{\circ}\text{C}$  gehalten werden. Die tägliche Erhöhung auf  $\geq 60^{\circ}\text{C}$  zur Abtötung von Legionellen ist nur bei Großanlagen Pflicht. Kleinanlagen (Ein- und Zweifamilienhäuser eingeschlossen) sind davon ausgenommen (vgl. Glaesmann, 2022: S. 128, 189).

Die anschließende Wahl der Wärmepumpe hängt von der gewünschten Betriebsweise ab. Ist eine monovalente Betriebsweise gewünscht, so muss eine Wärmepumpe gewählt werden, dessen Leistung des Heizbedarfs des Gebäudes bei Norm-Außentemperatur entspricht.



## 2.1.6 Messkonzept

Da Wärmepumpen als steuerbare Verbrauchseinrichtungen gelten, besteht die Möglichkeit für die Wärmepumpe einen separaten Stromtarif abzuschließen. Dieser ist wesentlich kostengünstiger als der herkömmliche Haushaltsstromtarif. Die technische Voraussetzung für einen Wärmepumpentarif ist ein separater Stromzähler, der den Strombezug der Wärmepumpe misst. Im Gegenzug behält sich der Netzbetreiber das Recht vor, die Wärmepumpe zu gewissen Tageszeiten bei z.B. Spitzenanforderungen zur Optimierung des Lastmanagements im Stromnetz abzuschalten (vgl. Glaesmann, 2022: S. 103).

Damit die Strombezüge im Gebäude korrekt gemessen und vom Netzbetreiber abgerechnet werden können, geben die Netzbetreiber die Anordnung der Stromzähler in sogenannten Messkonzepten vor. Die Wahl des korrekten Messkonzeptes wird speziell bei der Kombination einer Wärmepumpe mit Photovoltaik wichtig. Der Zähler der Wärmepumpe muss mithilfe einer Kaskadenschaltung mit dem Zähler der PV-Anlage in Reihe geschaltet werden, da ansonsten die Wärmepumpe den erzeugten PV-Strom nicht verwenden kann (vgl. Stadtwerke Ratingen, 2021: S. 18; vgl. Westnetz GmbH, 2021: S 9).

In der Abbildung 8 ist ein Messkonzept zur Nutzung von PV-Strom für die Wärmepumpe dargestellt. Abbildung 9 stellt ein mögliches Messkonzept einer Wärmepumpe mit separatem Stromzähler dar.

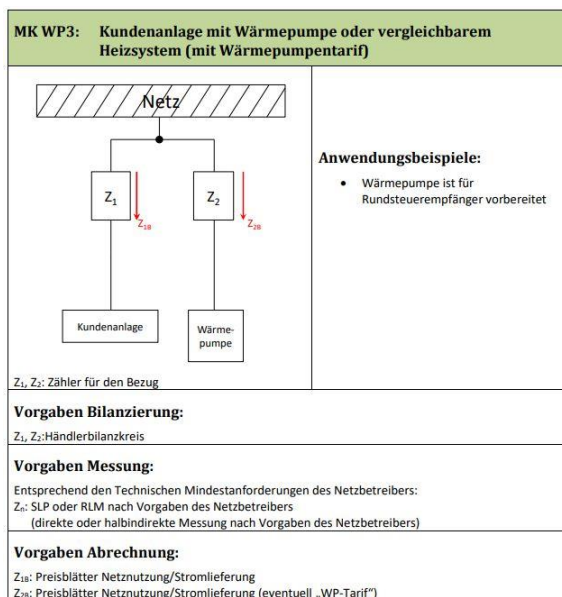


Abbildung 9 Messkonzept WP3 der Stadtwerke Ratingen für Wärmepumpe mit Wärmepumpentarif (Stadtwerke Ratingen, 2021: S. 18)

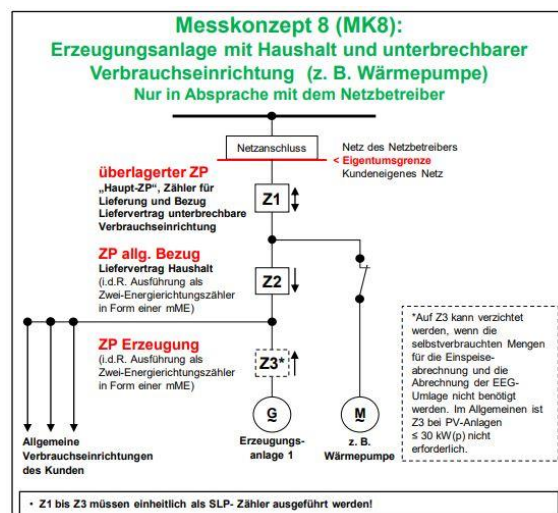


Abbildung 8 Messkonzept 8 der Westnetz GmbH für Wärmepumpe und PV-Erzeugungsanlage; Für Bezug der Wärmepumpe (Z1) und Haushalt (Z2) sind zwei unterschiedliche Stromlieferverträge abzuschließen (Westnetz GmbH, 2021: S. 9)

## 2.2 PV-Anlage

Mit der Photovoltaik ist es möglich die frei verfügbare Sonnenenergie zu nutzen, um Strom zu erzeugen. Wie das solare Strahlungsangebot auf der Erde ist und wie sich die Sonnenstrahlung zusammensetzt wird in dem kommenden Kapitel erläutert. Ebenfalls wird der Aufbau einer Photovoltaikanlage und die Auswirkung der Ausrichtung der Solarmodule auf den Solarertrag beschrieben.

### 2.2.1 Solares Strahlungsangebot

Die Sonne strahlt mit einer Bestrahlungsstärke von  $1367 \frac{W}{m^2}$  auf die Atmosphäre der Erde. Tritt das Sonnenlicht nun in die Atmosphäre ein, wird das Sonnenlicht durch Reflexion, Absorption und Streuung abgeschwächt (vgl. Mertens, 2020: S. 42f). Diese Effekte werden noch verstärkt je länger der Weg des Sonnenlichts durch die Atmosphäre ist. Die Wegverlängerung durch die Atmosphäre wird mit dem Begriff „Air Mass (AM)“ bezeichnet und ist abhängig von dem Sonnenstand. Der Sonnenstand variiert nach Tages- und Jahreszeit. Das Standardspektrum für Photovoltaikmodule ist das AM 1,5-Spektrum (vgl. Mertens, 2020: S. 43).

In der Folgenden Abbildung 10 ist die Veränderung des Sonnenstands bzw. der Air Mass an unterschiedlichen Tagen für den Standort Berlin dargestellt. Es wird verdeutlicht, dass der Weg der Strahlung durch die Atmosphäre im Winter (22.12., AM 4) sehr viel länger ist, als beim optimalen Sonnenstand AM 1,5 und dadurch im Winter weniger Strahlungsenergie als im Sommer am Solarmodul ankommt.

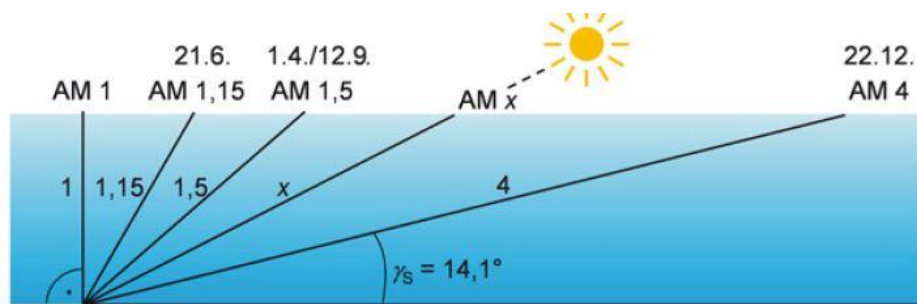


Abbildung 10 Die Wegverlängerung und die Veränderung der Air Mass an unterschiedlichen Tagen am Standort Berlin (vgl. Mertens, 2020: S. 43)

Die Globalstrahlung, die schlussendlich auf der Erde auftritt, setzt sich aus der Direktstrahlung und der Diffusstrahlung zusammen. Als Direktstrahlung wird der Strahlungsanteil genannt, der direkt auf das Solarmodul trifft. Der diffuse Strahlungsanteil wird durch Reflexion und Streuung zum Solarmodul gelenkt. Die Globalstrahlung beträgt an einem klaren Sommertag  $E_G = 1000 \frac{W}{m^2}$  und wurde als Standardtestbedingung für Solarmodule etabliert (vgl. Mertens, 2020: 44). In Abbildung 11 ist dargestellt, wie sich die Globalstrahlung zusammensetzt.

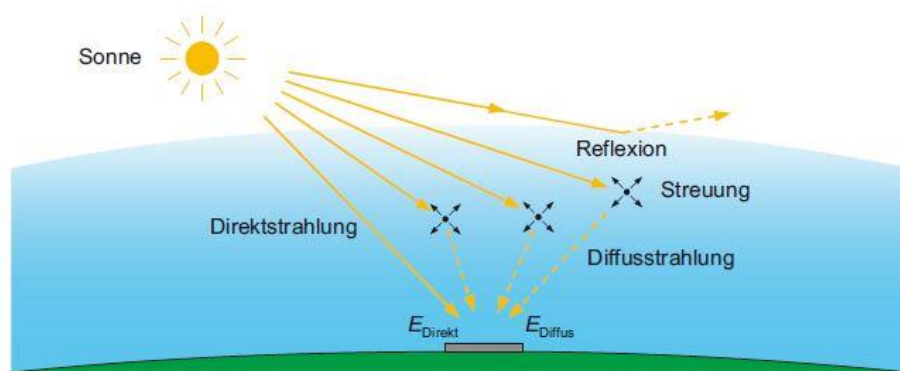


Abbildung 11 Zusammensetzung der Globalstrahlung aus Direktstrahlung und Diffusstrahlung (Mertens, 2020: S. 44)

### 2.2.2 Aufbau einer Photovoltaikanlage

Eine Photovoltaikanlage besteht aus mehreren Komponenten. In der folgenden Abbildung 12 ist der Aufbau einer netzgekoppelten Photovoltaikanlage dargestellt, wie sie häufig in Gebäuden zu finden ist.

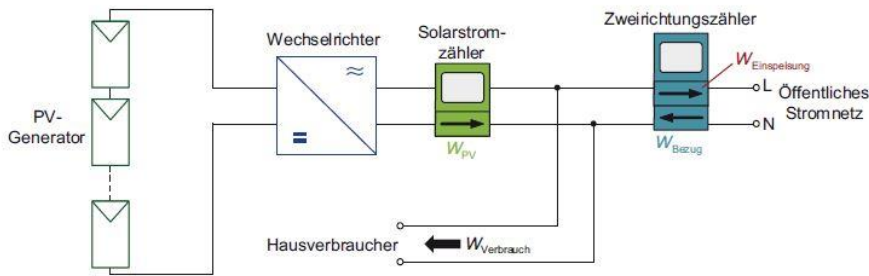


Abbildung 12 Aufbau einer netzgekoppelten Photovoltaikanlage (Mertens, 2020: S. 201)

Die Kernkomponente einer Photovoltaikanlage stellt der PV-Generator dar. Der PV-Generator setzt sich aus mehreren Photovoltaikmodulen zusammen, welche in Reihe geschaltet sind. Ein Zusammenschluss von Photovoltaikmodulen wird „String“ genannt. Die Photovoltaikmodule erzeugen durch den sogenannten „Photovoltaischen Effekt“ Gleichstrom (DC) und liefern diesen durch Stringkabel an den Wechselrichter (vgl. Wietschel, 2015: S. 123). Die Wahl des Montagesystems für die Module hängt von der Art des Daches ab, welches belegt werden soll. Eine typische Ausführung ist die dachparallele Montage auf einem Schrägdach. Die Module werden hier auf einer Unterkonstruktion bestehend aus Aluminiumschienen oder verzinktem Stahl montiert. Die Unterkonstruktion selbst wird mit Dachhaken am Dachsparren befestigt (vgl. Wesselak & Voswinckel, 2012: S. 87).

Da die PV-Module Gleichstrom erzeugen, die elektrischen Verbraucher in einem Gebäude jedoch auf Wechselstrom (AC) ausgelegt sind, ist es nötig diesen von Gleichstrom in Wechselstrom umzuwandeln. Zu diesem Zweck wird ein Wechselrichter benötigt, welcher Gleichstrom in entweder einphasigen oder dreiphasigen Wechselstrom transferiert und anschließend in das Hausnetz oder das öffentliche Stromnetz einspeist (vgl. Wesselak & Voswinckel, 2012: S. 71f). Wechselrichter haben zudem weitere Systemkomponenten wie z.B. zur Steuerung, Regelung und Systemüberwachung verbaut, da das Einspeisen in das öffentliche Stromnetz gewisser Anforderungen der Netzbetreiber erfüllen muss. Dies wäre bspw. die Einspeisung ins Netz synchron mit der Netzfrequenz oder die Überwachung des Netzes auf Spannung und Frequenz (öffentl. Stromnetz 230 V/50 Hz) (vgl. Mertens, 2020: S. 203f, 218). Damit die größte mögliche Leistung abgegeben werden kann, verfügt der Wechselrichter über einen Maximum-Power-Point (MPP) Regler. Der MPP-Regler ist nötig, da sich der Arbeitspunkt der Anlage stetig durch die schwankende Bestrahlungsstärke und durch Temperaturänderungen verschiebt und somit nicht mehr am Punkt mit der maximalen Leistung arbeitet. Der MPP-Regler muss somit stetig überwacht und automatisch nachgeregelt werden (vgl. Wesselak & Voswinckel, 2012: S. 73).

Die Integration eines Wechselrichters kann in unterschiedlichen Konzepten erfolgen wie z.B. als Zentralwechselrichter oder als String-Wechselrichter. Ein Zentralwechselrichter ist alleinig zuständig für die angeschlossenen Strings, während bei einem String-Wechselrichter jeder String seinen eigenen Wechselrichter besitzt (vgl. Mertens, 2020: S. 202). Beachtet werden muss, bei der Wahl des Wechselrichters, ob er einphasig oder dreiphasig in das Netz einspeist. Um eine Schiefast im Stromnetz zu vermeiden, dürfen einphasige Wechselrichter aufgrund der Phasenschieflastgrenze von 4,6 kVA nicht mehr als 4,6 kW einspeisen. Dies hat zur Folge, dass bei einphasigen Wechselrichtern mit einem angeschlossenen String, mit einer höheren Leistung als die Phasenschieflastgrenze, die restliche Leistung nicht mehr eingespeist werden kann. In dem Fall sollte ein dreiphasiger Wechselrichter verwendet werden oder die Stringverteilung angepasst werden (vgl. Mertens, 2020: S. 219; vgl. Wesselak & Voswinckel, 2012: S. 73).

### 2.2.3 Performance von Photovoltaikanlagen

Neben der am Standort auftretenden Globalstrahlung ist ebenfalls die Ausrichtung und Neigung der Module ausschlaggebend für deren Ertrag. Eine korrekte Ausrichtung der Module ist notwendig, um möglichst viel von der Sonnenstrahlung (siehe Kapitel 2.2.1) einzufangen. Der optimale Ertrag lässt sich durch eine Ausrichtung nach Süden und einer Modulneigung von 30° in den Sommermonaten erreichen (vgl. Konrad, 2008: S. 7; vgl. Mertens, 2020: S. 58).

In Abbildung 13 ist dargestellt inwieweit sich die Einstrahlung auf ein PV-Modul in Abhängigkeit von Ausrichtung und Neigung verändert.

Modulneigung	10°	30°	90°
Ost-Ausrichtung	90 %	85 %	60 %
Süd-Ausrichtung	90 %	100 %	75 %
West-Ausrichtung	90 %	85 %	60 %
Nord-Ausrichtung	90 %	70 %	30 %

Abbildung 13 Abweichung vom Optimum auf Einstrahlungswerte von Ausrichtung und Neigung (Konrad, 2008: S. 7)

Bei Bestandsgebäuden ist die Ausrichtung und die mögliche Neigung meist jedoch durch die Art des Daches vorgegeben. Dies tritt besonders bei Schrägdächern auf, welche durch ihre Dachschräge bereits eine gewisse Neigung vorgeben. Eine Ausrichtung und Neigung nach dem Optimum sind dementsprechend bei Schrägdächern nicht möglich (vgl. Wesselak & Voswinckel, 2012: S. 87f). Eine Abweichung vom Optimum kann jedoch auch von Nutzen sein. Eine Ost-/West-Ausrichtung der Module würde beispielsweise den Ertrag am Morgen und Abend verbessern. Da die meisten Menschen Tagsüber außerhaus sind, wäre der Stromverbrauch in den Mittagstunden geringer als in den Morgen- und Abendstunden. Daraus würde ein verbesserter Eigenverbrauch des produzierten Stroms erfolgen (vgl. Mertens, 2020: S. 52).

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Performance von Photovoltaikanlagen ist die Temperatur der PV-Module. Durch das Ansteigen der Temperatur dehnen sich die Halbleiteratome in der Solarzelle aus und die Eigenleitfähigkeit erhöht sich, wodurch sich die Leerlaufspannung und der MPP der Solarzelle verringert. Der Leistungsverlust bei Temperaturänderung wird mithilfe eines Temperaturkoeffizienten beschrieben, welcher im Durchschnitt  $-0,4 \frac{\%}{K}$  beträgt und in den Datenblättern der PV-Module zu finden ist (vgl. Wesselak & Voswinckel, 2012: S. 83f).

In Abbildung 14 ist die Kennlinie eines PV-Generators und dessen Veränderung des MPPs bei unterschiedlichen Temperaturen dargestellt.

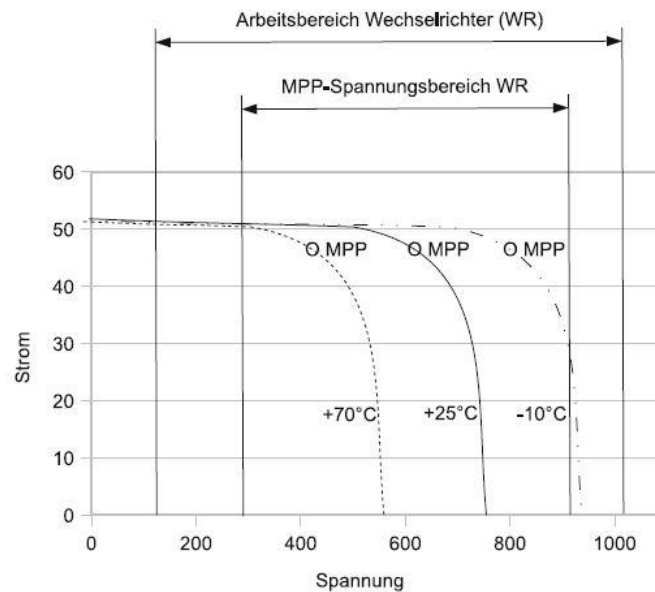


Abbildung 14 Veränderung des MPPs bei unterschiedlichen Temperaturen eines PV-Generators (Wesselak & Voswinckel, 2012: S. 84)

Um die Effektivität einer Photovoltaikanlage zu beschreiben wird der Systemwirkungsgrad oder auch Performance Ratio (PR) genannt herangezogen. Der PR beschreibt, wie effizient eine Photovoltaikanlage mit der auftretenden Strahlungsenergie umgeht und erlaubt Photovoltaikanlagen standortunabhängig miteinander zu vergleichen. Die PR beschreibt das Verhältnis eines End-Ertrags zu einem Referenz-Ertrag und wird nach Gleichung (5) berechnet (vgl. Mertens, 2020: S. 316; vgl. Wesselak & Voswinckel, 2012: S. 94).

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \quad (5)$$

$$\text{Mit } Y_R = \frac{H_G}{E_{STC}} \text{ und } Y_F = \frac{W_{AC}}{P_{STC}}$$

- $Y_F$ : Endertrag
- $Y_R$ : Referenzertrag
- $H_G$ : Jahreseinstrahlung in  $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$
- $E_{STC}$ : Standardglobalstrahlung  $1000 \frac{W}{m^2}$
- $W_{AC}$ : Eingespeiste Energie AC-Seitig in  $kWh$
- $P_{STC}$ : Anlagengröße in  $kW_p$

Ein typischer Wert für die Performance Ratio liegt bei 75 bis 85% und kann bei sehr guten Anlagen auch höher ausfallen (vgl. Mertens, 2020: S. 316; vgl. Wesselak & Voswinckel, 2012: S. 94).

## 2.3 Speichersystem

Im Folgenden wird auf Möglichkeiten eingegangen Energie zu speichern.

### 2.3.1 Stromspeicher

Der Aufbau einer Photovoltaikanlage aus Kapitel 2.2.2 Abbildung 12 kann zusätzlich durch einen Stromspeicher erweitert werden. Der Stromspeicher hat die Aufgabe erzeugten Strom für einen späteren Zeitpunkt dem Hausverbraucher zur Verfügung zu stellen und somit den Eigenstromverbrauch wesentlich zu erhöhen (vgl. Mertens, 2020: S. 225). Es bestehen zwei Möglichkeiten einen Stromspeicher in eine Photovoltaikanlage zu integrieren. Eine Möglichkeit

stellt dabei die sogenannte DC-Kopplung dar. Bei der DC-Kopplung wird die Batterie direkt mit dem erzeugten DC-Strom aus dem PV-Generator geladen. Durch einen DC/DC-Wandler wird die Spannung an die des Stromspeichers angepasst. Ein zusätzlicher Laderegler schützt den Stromspeicher vor Über- und Tiefenentladung. Ein Vorteil der DC-Kopplung ist, dass der erzeugte Strom unmittelbar zur Ladung genutzt werden kann und dadurch Transformationsverluste gering bleiben (vgl. Mertens, 2020: 225f, 232f).

Eine alternative Integration kann über die AC-Kopplung erfolgen. Hier erfolgt die Einbindung des Stromspeichers auf der AC-Seite der Photovoltaikanlage. Statt einem DC/DC-Wandler wird hier ein zusätzlicher Wechselrichter benötigt, der den erzeugten Strom erneut von AC wieder zurück zu DC transformiert. Dies hat höhere Transformationsverluste zur Folge. Da jedoch die Wirkungsgrade von aktuellen Wechselrichtern (>95%) sehr hoch ausfallen, fällt dies nicht so sehr ins Gewicht. Der wesentliche Vorteil dieser Kopplung ist die jederzeit mögliche Nachrüstung oder Erweiterung des Speichersystems (vgl. Mertens, 2020: S. 225f, 211).

In der Abbildung 15 ist die Integration eines Stromspeichers mittels AC-Kopplung dargestellt.

b) AC-Kopplung:

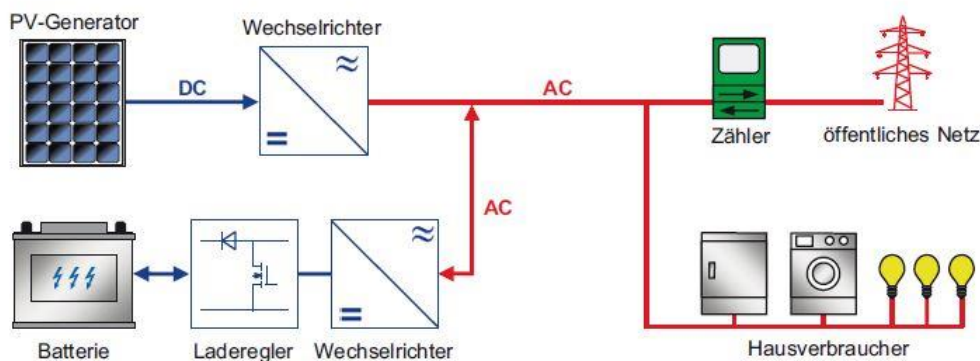


Abbildung 15 AC-Kopplung eines Stromspeichers in einer Photovoltaikanlage (Mertens, 2020: S. 226)

### 2.3.2 Thermische Speicher

Thermische Speicher bevorraten thermische Energie zur Nutzung an einem späteren Zeitpunkt als die Wärmeerzeugung. Thermische Energie kann zu unterschiedlichen Zwecken gespeichert werden wie z.B. zur Warmwasserbereitung in einem Warmwasserspeicher oder als Pufferspeicher dort, wo Wärmeerzeugung und -Verbrauch zeitlich entkoppelt werden sollen. Ein Pufferspeicher dient der Unterstützung des Wärmeerzeugers und kann seine gespeicherte thermische Energie für eine gewisse Zeit an das Wärmeverteilsystem des Gebäudes abgeben ohne, dass der Wärmeerzeuger eingreifen muss (vgl. Baunetz Wissen, o.J.; vgl. Goeke, 2021: S. 5ff). Ein Heizwasser-Pufferspeicher kann eine gute Ergänzung zu einem Wärmepumpensystem mit einer PV-Anlage bilden, da überschüssig erzeugter Strom der PV-Anlage als thermische Energie im Pufferspeicher gespeichert werden kann. Besonders sinnvoll ist dies, da der Spitzenbedarf meist in den Morgen- und Abendstunden liegt und die Effizienz einer Wärmepumpe aufgrund der geringeren Außentemperaturen am Morgen und Abend geringer ist als in den Mittagsstunden (vgl. Baunetz Wissen, o.J.; vgl. Goeke, 2021: S: 5ff). Ein Thermischer Speicher ist ein mit Wasser gefüllter und optimal Wärmegeprägter Tank. Innerhalb des Tanks ist meist ein Wärmeübertrager in Form von Spiralrohren eingesetzt, welcher aufgrund der höheren Dichte von Kaltwasser im unteren Bereich des Speichers sitzt. Das Heizwasser aus dem Erzeuger z.B. Wärmepumpe fließt anschließend durch die Spiralrohre des Wärmeübertragers und gibt seine

Wärmeenergie nach dem Wärmetauscherprinzip an das im Tank befindliche Wasser ab. Es gibt noch mehrere Bauarten von thermischen Speichern auf die jedoch nicht weiter eingegangen wird. Das Speichervolumen kann über eine Faustformel überschlägig berechnet werden. So kann pro kW Heizleistung ein Speichervolumen von 40 bis 80 Litern angenommen werden (vgl. Baunetz Wissen, o.J.; vgl. Goeke, 2021: S. 119). Ein Pufferspeicher ist dann erforderlich, wenn der Mindestvolumenstrom der Wärmepumpe nicht dauerhaft aufrechterhalten werden kann. Dies ist vor allem bei Gebäuden mit Heizkörpern der Fall. Ein Unterschreiten des Mindestvolumenstroms der Wärmepumpe führt zu einer sogenannten Hochdruckstörung, bei der die Wärmepumpe abschaltet. Bei einer Hochdruckstörung entspricht die Rücklaufstemperatur nahezu der Vorlaufstemperatur, da die erzeugte Wärme aus dem Kältekreislauf nicht abgenommen werden kann. Um dies zu vermeiden ist ein ausreichend großes Heizwasservolumen notwendig. Ist im Heizungssystem weniger als 3 Liter pro kW Wärmepumpenleistung, so ist ein Pufferspeicher nötig. Wird für die Wärmepumpe ein Wärmepumpentarif nach Kapitel 2.1.6 gewählt, so wird ein Pufferspeicher zur Überbrückung der Sperrzeiten des Netzbetreibers benötigt (vgl. Glaesmann, 2022: S. 174f).

In Abbildung 16 ist ein thermischer Speicher dargestellt.

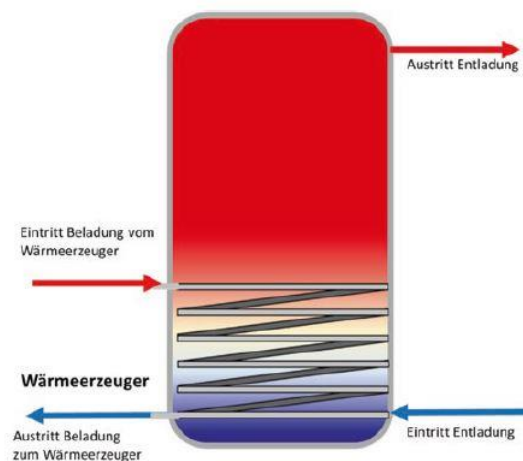


Abbildung 16 Thermischer Speicher mit Spiralrohr-Wärmeübertrager (Goeke, 2021: S. 123)

## 2.4 Betriebskosten und Förderungsmittel einer Wärmepumpe

Die Betriebskosten einer Wärmepumpe ergeben sich aus Kosten, die während des Betriebes der Anlage entstehen. Die Betriebskosten der Anlage setzen sich aus den betriebsgebundenen Kosten (Wartungs- und Instandhaltungsaufwand) und den verbrauchsgebundenen Kosten (Energiekosten) zusammen. In den Energiekosten sind die Stromkosten für den Betrieb der Wärmepumpe und für den Betrieb aller zusätzlichen Pumpen miteingeschlossen (vgl. Glaesmann, 2022: S. 43). Eine allgemeine Aussage zu den verbrauchsgebundenen Kosten lässt sich aufgrund der individuellen Rahmenbedingungen jeder Anlage nicht treffen, da die Energiekosten in starker Abhängigkeit zur Qualität der Gebäudehülle, der Wohnfläche, Anzahl der Personen und der Effizienz der Wärmepumpe stehen. Ausschlaggebend für den kosteneffizienten Betrieb einer Wärmepumpe ist die Jahresarbeitszahl (JAZ) (vgl. Glaesmann, 2022: S. 44ff).

In Abbildung 17 ist dargestellt, wie sich die Jahresarbeitszahl auf den Strombedarf auswirkt. Bereits eine Erhöhung der JAZ von 2 auf 3 bewirkt eine Reduzierung des Strombedarfs um 33%.

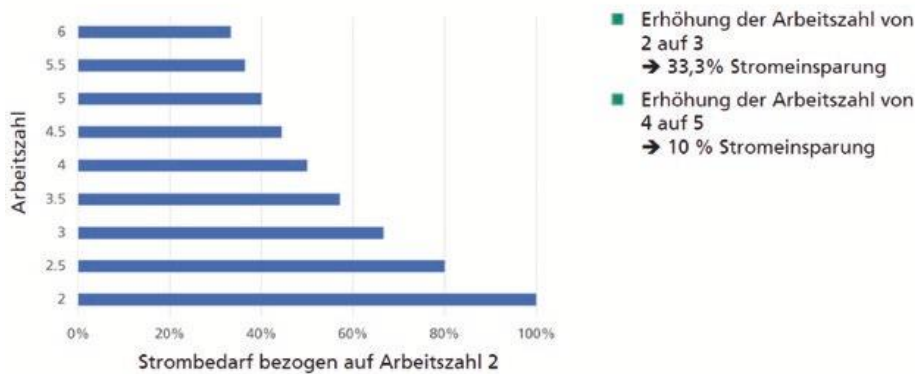


Abbildung 17 Auswirkung der JAZ auf den Strombedarf (Glaesmann, 2022: S. 46)

Wie die Berechnung der Stromkosten einer Wärmepumpe erfolgt, wird in der folgenden Gleichung (6) dargestellt (vgl. Glaesmann, 2022: S. 46).

$$\text{Stromkosten} = \frac{\text{Gesamtenergiebedarf} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{a}} \right]}{\text{JAZ}} \cdot \text{Strompreis} \left[ \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] \quad (6)$$

Die Wartungs- und Instandhaltungskosten bei Wärmepumpen sind im Gegensatz zu Gas- oder Ölkesseln gering. Die jährliche Wartung einer Wärmepumpe besteht lediglich aus einer Anlagen- und einer Kältemittelkontrolle. Die jährlichen Wartungs- und Instandhaltungskosten für Wärmepumpen betragen zwischen 50€ und 200€ und fallen in den Gesamtbetriebskosten somit kaum auf (vgl. Glaesmann, 2022: S. 47).

Durch die am 01.01.2024 in Kraft getretene 2. Novelle des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) sollen konsequent nur neue Heizungen mit mindestens 65% erneuerbaren Energien verbaut werden (vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2023). Im Zuge dessen wurde zeitgleich die Förderrichtlinie „Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG)“ am 01. Januar 2024 gestartet. Mit dieser Förderrichtlinie soll der Umstieg auf klimafreundliche Heizungen gefördert werden. Aufgeteilt ist das BEG in vier Teilbereiche (vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2024):

- „Wohngebäude (BEG WG) – Sanierung von Wohngebäuden“
- „Nichtwohngebäude (BEG NWG) – Sanierung von Nichtwohngebäuden“
- „Einzelmaßnahmen (BEG EM) – Sanierung mit Einzelmaßnahmen an Wohn- oder Nichtwohngebäuden“
- „Klimafreundlicher Neubau (BEG KfN) – Neubau von Wohn- und Nichtwohngebäuden“

Die Teilbereiche BEG WG, BEG NWG und BEG KfN sind dabei im Hauptbereich „Systemische Maßnahmen“ zusammengefasst und hat die Absicht Gebäudeeigentümer, welche durch die Sanierung ihres Gebäudes eine Effizienzgebäude-Stufe erreichen wollen. Ein Effizienzgebäude zeichnet sich durch eine energetisch optimierte Bauweise und Anlagentechnik, welche die technischen Mindestanforderungen einer Effizienzgebäude-Stufe erfüllt (vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2024). Effizienzgebäude-Stufen sind z.B. Effizienzhaus (EH) 40, 55, 70 oder 85 und werden von der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) definiert. Bspw. benötigt ein EH 55 nur 55% des Primärenergiebedarfs im Vergleich zum Referenzgebäudes des GEG (vgl. KfW, o.J.).



Für den Heizungsaustausch besonders relevant ist jedoch der Hauptbereich „Einzelmaßnahmen“ in dem die BEG EM angesiedelt ist. Konkret sind für den Heizungstausch folgende Investitionskostenzuschüsse nach Tabelle 2 möglich.

Tabelle 2 Förderungsmittel Heizungsaustausch (vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2024)

Zuschussarten	Förderungshöhe
Grundförderung neuer Heizungen auf Basis erneuerbarer Energien	30%
Wärmepumpen mit Wärmequelle Wasser, Erdreich oder Abwasser oder einem natürlichen Kältemittel	5%
Klimageschwindigkeits-Bonus. Wird selbstnutzenden Eigentümer:innen für den frühzeitigen Heizungsaustausch gewährt. Ab 2029 sinkt er alle 3 Jahre um 3%	20% (bis 31.12.2028)
Einkommensabhängiger Bonus für selbstnutzende Eigentümer:innen mit bis zu 40.000€ zu versteuerndem Haushaltseinkommen	30%

Die Förderungshöhe ist maximal auf 70% kumulierbar. Die maximal förderfähigen Ausgaben für den Heizungstausch beträgt für ein Einfamilienhaus oder der ersten Wohneinheit in einem Mehrparteienhaus 30.000€. Der maximal mögliche Investitionskostenzuschuss für selbstnutzende Eigentümer:innen beträgt bei einem maximalen Fördersatz von 70% 21.000€ (vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2024).

Weiterhin gibt es Zuschüsse für weitere Effizienzmaßnahmen, wie Dämmung der Gebäudehülle, Anlagentechnik und Heizungsoptimierung. Der Höchstfördersatz beträgt hier 20%, wobei der Grundfördersatz mit 15% veranschlagt ist. Die zusätzlichen 5% gibt es für das Vorlegen eines individuellen Sanierungsfahrplans. Die maximal förderfähigen Ausgaben für Effizienzmaßnahmen liegen bei 60.000€ pro Wohneinheit bei vorliegendem Sanierungsfahrplan. Ohne Sanierungsfahrplan betragen die maximalen förderfähigen Ausgaben nur 30.000€ (vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2024).

Beantragt wird die Förderung des Heizungstausches bei der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW). Einzelne Effizienzmaßnahmen werden beim Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) beantragt. Welche Wärmepumpen förderfähig sind und welche nicht kann aus einer vom BAFA veröffentlichten Liste „Liste der förderfähigen Wärmepumpen mit Prüf- und Effizienznachweis“ entnommen werden (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, 2023; Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2024).

## 2.5 Parameter zur Bewertung eines Gebäudes

Die Folgende Abbildung 18 stellt die Energieflüsse innerhalb eines Gebäudes dar.

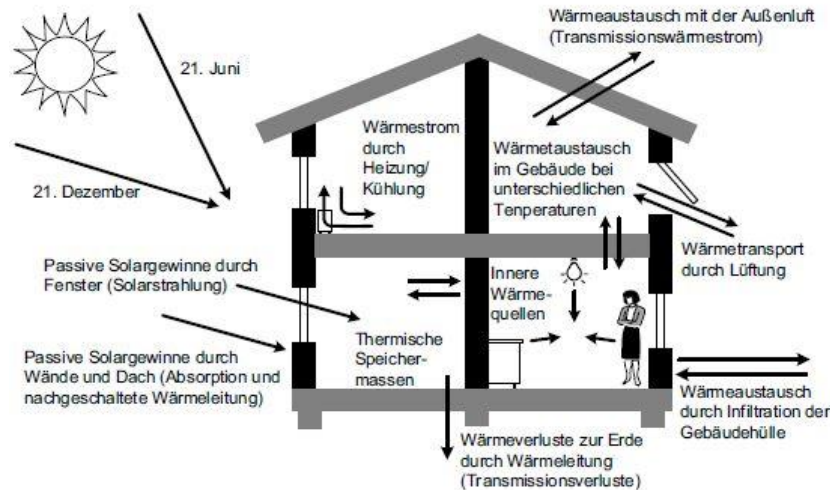


Abbildung 18 Energieflüsse in einem Gebäude (Kaltschmitt, 2020: S. 194)

Da ein Gebäude mit seiner Gebäudehülle stetig der Umgebung ausgesetzt ist, kommt es an der Gebäudehülle durch Wärmeleitung zu Wärmeverlusten oder auch Wärmegewinnen innerhalb des Gebäudes. Beeinflusst wird der Wärmetransport durch die Gebäudehülle von den Materialeigenschaften und zum Großteil aus der Differenz zwischen Außen- und Innentemperatur (vgl. Kaltschmitt, 2020: S. 194f).

Die wichtigste Kennzahl einer Gebäudehülle ist der sogenannte Wärmedurchgangskoeffizient  $U \left[ \frac{W}{(m^2 \cdot K)} \right]$ . Er wird aus dem Kehrwert des Wärmedurchlasswiderstandes  $R$  gebildet, welcher die Wärmeleitfähigkeit durch ein Bauteil beschreibt. Der Wärmedurchlasswiderstand wird maßgeblich von der Dicke  $d$  [m] und der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda \left[ \frac{W}{(m \cdot K)} \right]$  beeinflusst und berechnet sich für einschichtige und mehrschichtige Bauteile nach Gleichung (7) (vgl. Kaltschmitt, 2020: S. 4f):

$$R = \frac{d}{\lambda} = \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} \quad (7)$$

Damit eine Gebäudehülle als energetisch hochwertig bezeichnet werden kann, muss folglich die Wärmeleitfähigkeit bzw. U-Wert der verwendeten Materialien möglichst gering sein. Der Referenzstandard nach Gebäudeenergiegesetz für ein U-Wert der Außenwand beträgt aktuell  $0,28 \frac{W}{(m^2 \cdot K)}$ . In der Tabelle 3 sind Wärmeleitfähigkeiten der gängigen Materialien zum Aufbau einer Gebäudehülle aufgeführt.

Tabelle 3 Wärmeleitfähigkeiten gängiger Baustoffe für die Gebäudehülle (vgl. Hegger, 2012: S. 136, 29; vgl. Laasch & Laasch, 2013: S. 499)

Material	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ in $\left[ \frac{W}{(m \cdot K)} \right]$
<b>Polystyrol-Hartschaum (EPS)</b>	0,035 – 0,045
<b>Polyurethan-Hartschaum (PUR)</b>	0,030 – 0,040
<b>Glaswolle/Steinwolle</b>	0,025 – 0,035
<b>Vollziegel</b>	0,96
<b>Luft</b>	0,024
<b>Normalbeton</b>	2,1
<b>Zement-Estrich</b>	1,4

Außenwandkonstruktionen können auf verschiedenen Arten realisiert werden.

Nach Abbildung 19 sind die gängigen Konstruktionen der einschalige, einschichtige (a); der einschalig, mehrschichtige (b); der mehrschalige, einschichtige (c) und der mehrschalig, mehrschichtige (d) Aufbau. Viele Bestandsgebäude in Deutschland wurden vor der ersten Wärmeschutzverordnung im Jahr 1979 erbaut (vgl. Deutsche Energie-Agentur, o.J.). Dementsprechend sind deren Außenwände wegen

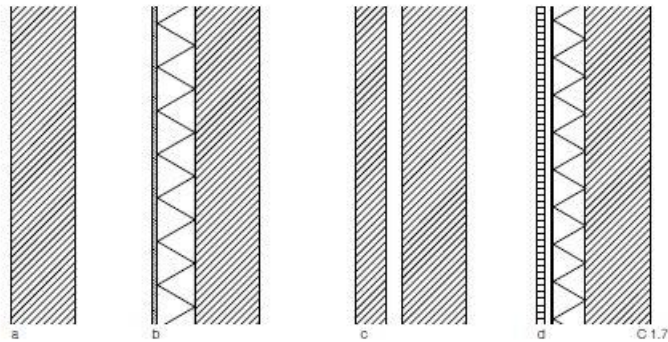


Abbildung 19 Außenwandkonstruktionen (links: Außenseite) (Hegger, 2012: S. 106)

mangelhaften Wärmeschutz häufig nach Variante (a) oder (c) aufgebaut, welche aufgrund ihrer Einschichten-Bauweise einen hohen U-Wert aufweisen. Durch eine Sanierung mithilfe von Dämmmaterialien, die in Tabelle 3 aufgeführt sind, kann der Wärmeschutz gesteigert werden. Folglich sind zum Wärmeschutz die Außenwandkonstruktion nach Variante (b) oder (d) zu bevorzugen (vgl. Hegger, 2012).

Der Nachweis über den energetischen Zustand des Gebäudes erfolgt über den Gebäudeenergieausweis. Der Gebäudeenergieausweis erlaubt den direkten Vergleich unterschiedlicher Gebäude und soll den Energieverbrauch sichtbar machen. Der Energieausweis kann verbrauchsorientiert oder bedarfsorientiert erstellt werden, wobei der verbrauchsorientierte Energieausweis keine direkte Aussagekraft über den Gebäudezustand erlaubt, da der Energieverbrauch eher die Heizgewohnheiten der Bewohner widerspiegelt. Der bedarfsorientierte Energieausweis berücksichtigt die gesamte Gebäudesubstanz und ist deshalb besser für die Beurteilung über den energetischen Zustand des Gebäudes geeignet (vgl. Sobotta, 2022: S. 16f). Die Energieeffizienzklassen sind im Gebäudeenergiegesetz geregelt. Nach GEG Anlage 10 befindet sich ein Gebäude mit einem Endenergieverbrauch oder -bedarf von  $\leq 100 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$  in der Energieeffizienzkategorie C.

### 3 Eignungsanalyse – Simulation

Im Folgenden werden die Methodik, das Simulationstool „PolySun“, die benötigten Dokumente und die Anlagenvarianten vorgestellt.

#### 3.1 Methodik

Mithilfe einer Simulation sollen die folgenden aufgestellten Leitfragen beantwortet werden:

1. Welche Häuser kommen für die Installation einer Wärmepumpe in Frage?
2. Ist es aus technischer und wirtschaftlicher Sichtweise sinnvoll eine Wärmepumpe mit einer Photovoltaikanlage zu betreiben?

Für eine Simulation wurde sich entschieden, da sich so die Performance von Wärmepumpen ohne großen Aufwand beobachten lassen. Im Simulationstool kann ein Gebäude definiert werden und die Wärmepumpe oder andere Anlagenbauteile beliebig ausgetauscht werden. So wird ein direkter Vergleich der Wärmepumpen und unterschiedlicher Anlagenvarianten möglich.

In dieser Bachelorarbeit wird ein beliebiges Bestandsgebäude ausgewählt und in PolySun nachgebildet. Dazu werden alle benötigten Parameter wie Gebäudeheizlast und Warmwasserbedarf berechnet (siehe Kapitel 3.3). Anschließend werden drei verschiedene Anlagenvarianten definiert und simuliert:

In der ersten Anlagenvariante wird die bestehende Gasheizung im IST-Zustand des Gebäudes durch eine Wärmepumpe ausgetauscht. Ein vorhandener Warmwasserspeicher für die Trinkwasserversorgung wird übernommen, wenn vorhanden. Insgesamt werden drei unterschiedlich ausgelegte Wärmepumpen ausgewählt und simuliert. Eine Wärmepumpe wird so ausgelegt, dass dessen Heizleistung bei Norm-Außentemperatur der Gebäudeheizlast entspricht. Die nächsten beiden Wärmepumpen haben jeweils absteigend weniger Heizleistung, um den Einfluss des internen elektrischen Heizstabes zu untersuchen.

In der zweiten Anlagenvariante wird die Wärmepumpe durch eine Photovoltaikanlage mit Stromspeicher ergänzt. Es werden unterschiedliche Stromspeicherkapazitäten simuliert, um dessen Einfluss auf das System zu untersuchen. Die Simulation der Photovoltaikanlage mit Stromspeicher wird mit den in Anlagenvariante 1 ausgewählten Wärmepumpen durchgeführt. Die optimale Stromspeicherkapazität wird anschließend ermittelt.

In der dritten Anlagenvariante wird zusätzlich ein Pufferspeicher in das System integriert. Das Photovoltaikanlagensystem aus Anlagenvariante 2 wird für diese Anlagenvariante fest eingestellt. Dazu wird die ermittelte optimale Stromspeicherkapazität gewählt. Die Simulation wird mit den in Anlagenvariante 1 definierten Wärmepumpen und bei unterschiedlich definierten Pufferspeichervolumen durchgeführt. Das optimale Pufferspeichervolumen wird anschließend ermittelt.

Durchgeführt wird jede Anlagenvariante bei Vorlauftemperatur 50, 55 und 60°C und bei Soll-Raumtemperatur 20°C und 25°C. Für jeden geänderten Parameter wird eine neue Simulation gestartet. Beispiel:

- Anlagenvariante 2 – Wärmepumpe 1 mit PV und Stromspeicherkapazität 5 kWh bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 20°C.

Die eingestellte Stromspeicherkapazität im genannten Beispiel wird nacheinander bei 55°C und 60°C Vorlauftemperatur nochmals durchgeführt. Anschließend wird die Soll-Raumtemperatur auf 25°C erhöht und nochmals bei allen definierten Vorlauftemperaturen simuliert.

Die Ergebnisse jeder Anlagenvariante werden aufgeführt und anschließend für jede Anlagenvariante einzeln ausgewertet. Am Ende jeder Anlagenvariante werden die Betriebskosten auf Basis der in PolySun ausgegebenen System-Jahresarbeitszahl, Energiebedarfs und der aktuellen Strompreise im Vergleich zum IST-Zustand dargestellt. Berechnet werden die Betriebskosten einmal mit dem aktuellen Haushaltsstromtarif und einem Wärmepumpentarif. In der Betrachtung der Betriebskosten fließen nur die Energiekosten der thermischen Komponenten ein. Die Energiekosten der restlichen elektrischen Verbraucher des Hauses fließen dort nicht ein.

Im Anschluss wird eine wirtschaftliche Betrachtung durchgeführt, in der die Betriebskosten aller Anlagenvarianten miteinander verglichen werden, um die Anlagenvariante mit den günstigsten Betriebskosten zu ermitteln. Mit diesen Betriebskosten und den Investitionskosten wird anschließend eine Amortisationsrechnung durchgeführt. In diesen Vergleich aller

Anlagenvarianten werden nur die optimalen Betriebsbedingungen der einzelnen Anlagenvarianten betrachtet.

### 3.2 Benötigte Programme und Dokumente

Im Folgenden wird das verwendete Simulationstool „PolySun“ vorgestellt und welche Dokumente zum Gebäude benötigt werden, um das Gebäude möglichst gut in der Simulation abbilden zu können.

#### 3.2.1 Vorstellung Simulationstool „PolySun“

Verwendet wird die Software „PolySun – Designer“ (im weiteren Verlauf nur als PolySun bezeichnet). Dies ist ein Programm zur Simulation von solarthermischen, photovoltaischen und geothermischen Systemen. Im Gegensatz zu anderen Simulationsprogrammen auf dem Markt wie bspw. T-Sol oder PV-Sol können in PolySun thermische Anlagen und photovoltaische Anlagen in Kombination simuliert werden. So kann mit PolySun ein möglichst realitätsnaher Betrieb der Anlage simuliert werden. PolySun verfügt über eine große Auswahl an Komponenten diverser Hersteller, die miteinander verknüpft werden können. Simulationsergebnisse können auf verschiedenste Arten ausgegeben werden wie z.B. als System-Resultate, Resultate einzelner Komponenten, tabellarische als auch grafische Auswertung oder als Energieflussdiagramm (Vela Solaris, 2023). Für genauere Einblicke in PolySun siehe Kapitel 3.3 bis 3.6. In diesen Kapiteln ist der Aufbau der Anlagenvarianten und die möglichen Einstellungen der Komponenten dargestellt.

#### 3.2.2 Benötigte Dokumente

Damit das Gebäude in PolySun bestmöglich abgebildet werden kann, werden Dokumente des Gebäudes benötigt. Dies können bspw. Grundrisse, Dokumente über die Gebäudehülle oder eine bereits durchgeführte Heizlastberechnung sein. Zum Vergleichen der Ergebnisse werden die letzten drei Energiekostenabrechnungen benötigt, auf denen der Brennstoff- und Stromverbrauch aufgeführt ist.

### 3.3 Vorstellung ausgewähltes Gebäude

Das ausgewählte Gebäude, bei dem die Simulation durchgeführt werden soll, ist ein zweistöckiges Gebäude an dem Standort 25421 Pinneberg und einer Norm-Außentemperatur von  $-9,5^{\circ}\text{C}$  nach Klimakarte des BWP. Die Folgende Abbildung 20 stellt das ausgewählte Gebäude dar.



Abbildung 20 Ausgewähltes Gebäude am Standort 25421 Pinneberg (eigene Darstellung)

Die Folgende Abbildung 21 und 22 stellen den Grundriss des Gebäudes dar. Im Jahre 2004 wurde das Gebäude um einen einstöckigen Anbau erweitert. Der Anbau weist einen besseren Wärmeschutz als das bereits bestehende Gebäude auf, da dieser nach Vorgaben der damaligen

Energieeinsparverordnung (EnEV) gebaut wurde. Genaue Angaben über den Aufbau der Außenwand des Gebäudes existieren nicht.

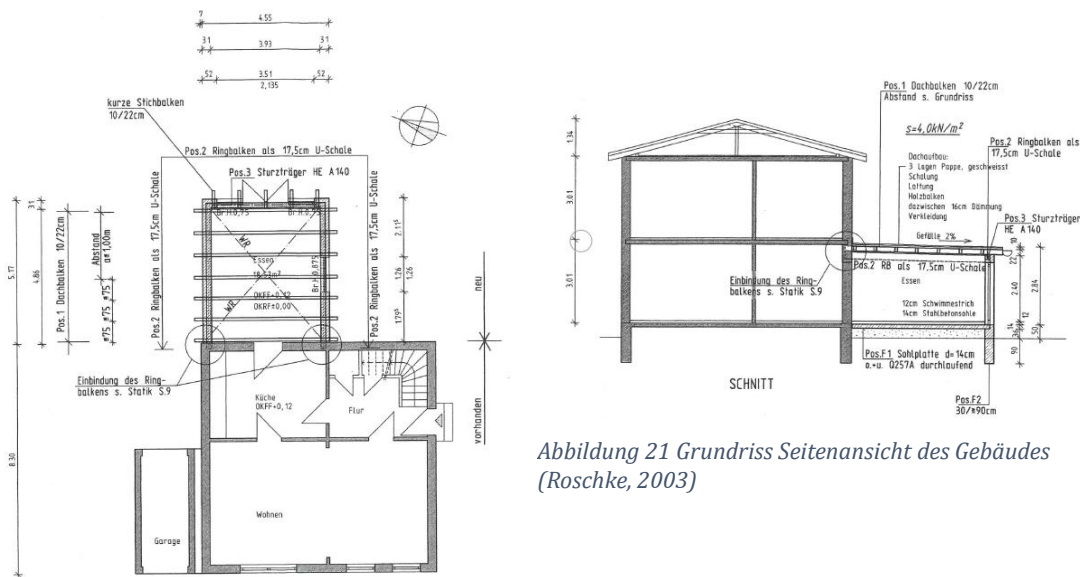


Abbildung 21 Grundriss Seitenansicht des Gebäudes (Roschke, 2003)

Abbildung 22 Grundriss des Gebäudes. Der Anbau ist geführt unter "Essen" (Roschke, 2003)

Nach dem Grundriss in Abb. 22 berechnet sich die Gesamtfläche des Gebäudes wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{Gesamtfläche} &= 2 \cdot (L_{\text{Gebäude}} \cdot B_{\text{Gebäude}}) + \text{Fläche}_{\text{Anbau}} = 2 \cdot (8,3 \text{ m} \cdot 8,4 \text{ m}) \cdot 2 + 18,53 \text{ m}^2 \\ &= 157,97 \text{ m}^2 \approx 158 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Die Gesamtfläche von  $158 \text{ m}^2$  wird von einer Gas-Heizung in Verbindung mit einem 120 Liter Warmwasserspeicher beheizt. Die Anzahl der Bewohner der in dem Gebäude lebenden Personen beträgt drei. In den folgenden Tabellen 4 und 5 ist der Stromverbrauch und der Brennstoffverbrauch der Jahre 2020, 2021 und 2022 aufgelistet. Der Brennstoffverbrauch bezieht sich auf eine eingestellte Raumtemperatur von  $20^\circ\text{C}$  im Gebäude.

Tabelle 4 Brennstoffverbrauch bezogen auf eingestellte Raumtemperatur im Gebäude von  $20^\circ\text{C}$  der Jahre 2020 bis 2022 (eigene Darstellung)

Jahr	Brennstoff	Verbrauch [kWh]
2020	Gas	23.210
2021	Gas	27.670
2022	Gas	19.343
Ø		23.407

Bei einem Gaspreis von aktuell  $12,26 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$  ergibt sich aus dem Durchschnittsverbrauch Brennstoffkosten von  $2.869,70 \text{ €}$  bei eingestellter Raumtemperatur  $20^\circ\text{C}$  (Statistisches Bundesamt, 2023). Um die Vergleichbarkeit mit den Betriebskosten der Wärmepumpe bei  $25^\circ\text{C}$  Raumtemperatur herzustellen, müssen die Brennstoffkosten des IST-Zustands auf  $25^\circ\text{C}$  hochgerechnet werden. Dazu wird dem durchschnittlichen Brennstoffverbrauch von  $23.407 \text{ kWh}$  nochmals  $6.000 \text{ kWh}$  draufgeschlagen. Die Annahme basiert auf den ausgegebenen Energiebedarf der Simulationsergebnisse in Kapitel 4.1, Tabelle 12. Aufgrund dessen würde der Brennstoffverbrauch  $29.407 \text{ kWh}$  betragen bei einer Raumtemperatur von  $25^\circ\text{C}$ . Die Betriebskosten betragen anschließend ausgehend vom aktuellen Gaspreis  $3.605,30 \text{ €}$ .

Tabelle 5 Stromverbrauch der Jahre 2020 bis 2022 (eigene Darstellung)

Jahr	Energie	Verbrauch [kWh]
2020	Strom	4.531
2021	Strom	4.272
2022	Strom	3.738
Ø		4.180

Bei einem Strompreis von aktuell  $42,29 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$  ergibt sich aus dem Durchschnittsverbrauch ein Strompreis von 1.766,47 € (Statistisches Bundesamt, 2023).

Im Folgenden wird die Heizlast des Gebäudes und der jährliche Warmwasserbedarf berechnet.

Die Heizlast wird nach Gleichung (4) (siehe Kapitel 2.1.5) berechnet. Der Heizleistungsfaktor wird mit  $80 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  angenommen, da es sich um ein Bestandsgebäude mit gedämmtem Dach handelt und im Jahr 2020 die Fenster und Türen saniert wurden.

$$\text{Heizlast} = \text{Heizfläche} \cdot \text{Heizleistungsfaktor} = 158 \text{ m}^2 \cdot 80 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 12,64 \text{ kW}$$

Für den Wärmebedarf werden ein täglicher Bedarf von 50 Litern bzw.  $0,05 \text{ m}^3$  angenommen. Der jährliche Warmwasserbedarf (WW-Bedarf) berechnet sich wie folgt.

$$\begin{aligned} \text{Jährlicher WW Bedarf} &= (\text{Bedarf}_d \cdot \text{Anzahl Bewohner}) \cdot 365 \frac{d}{a} = \left(0,05 \frac{\text{m}^3}{d} \cdot 3\right) \cdot 365 \frac{d}{a} \\ &= 54,75 \text{ m}^3 \approx 55 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Die abgeschätzte Zusatzleistung durch die Warmwasserbereitung wird nach Kapitel 2.1.5 auf  $0,3 \text{ kW pro Person}$  angenommen.

$$\text{Zusatzleistung} = 0,3 \text{ kW} \cdot 3 = 0,9 \text{ kW}$$

Ob diese Zusatzleistung mit in der Gesamtheizleistung berücksichtigt werden muss, wird geprüft, ob die berechnete Zusatzleistung  $\geq 20\%$  der Heizlast des Gebäudes ist.

$$\left(\frac{0,9 \text{ kW}}{12,64 \text{ kW}}\right) \cdot 100\% = 7,1\%$$

Die Zusatzleistung durch die Warmwasserbereitung nimmt nur 7,1% der Gebäudeheizlast ein und muss dadurch nicht in der Heizlast berücksichtigt werden. Somit muss die Wärmepumpe eine Heizlast von  $12,64 \text{ kW}$  abdecken.

Die folgende Abbildung 23 stellt das Anlagenschema des Gebäudes im Simulationsprogramm PolySun dar. Im Anlagenschema wurde ein leicht größerer Warmwasserspeicher ausgewählt, da ein 120 Liter Speicher in PolySun nicht auswählbar ist.

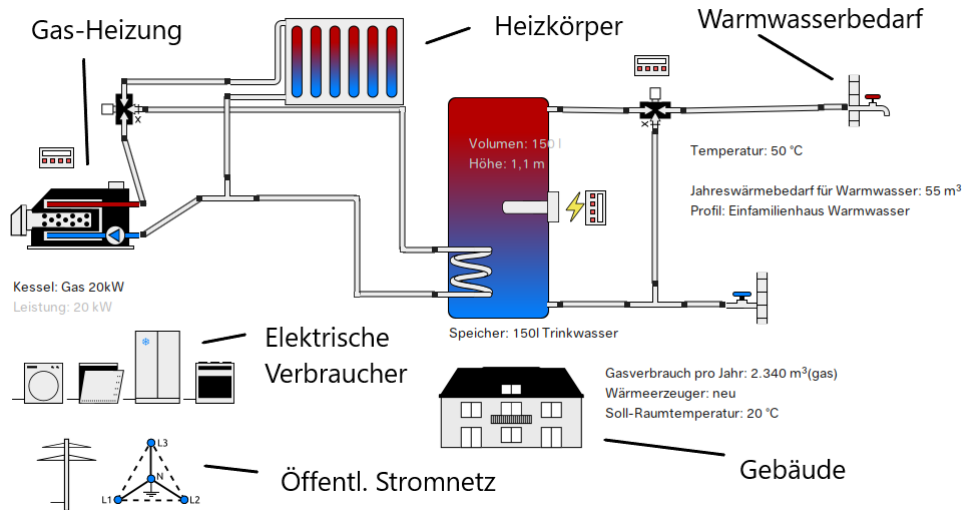


Abbildung 23 Anlagenschema des IST-Zustandes des Gebäudes (Vela Solaris, 2023 - Modifiziert)

Im Folgenden wird auf die Einstellungen des Warmwasserbedarfs, des Gebäudes, des elektrischen Verbrauchs und der Heizkörper eingegangen.

Die folgende Abbildung 24 stellt die Einstellungen des Warmwasserbedarfs dar.

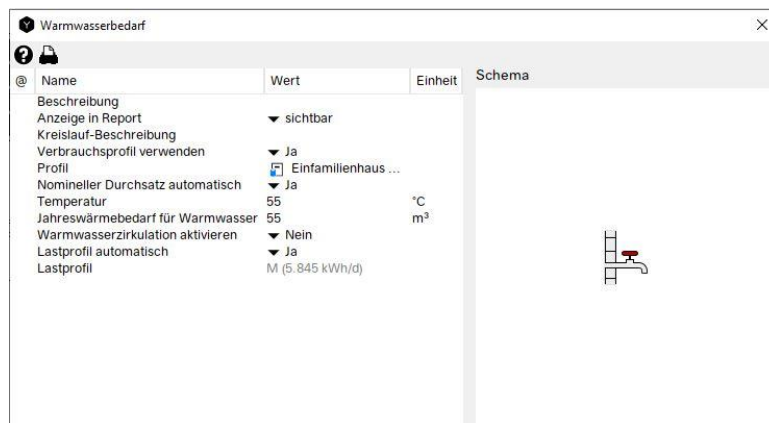


Abbildung 24 Einstellung des Warmwasserbedarfs in PolySun (Vela Solaris, 2023)

Für den Warmwasserbedarf wurde das Verbrauchsprofil „Einfamilienhaus Warmwasser“ gewählt und eine gewünschte Warmwassertemperatur von 55 °C. Der zuvor berechnete jährliche Warmwasserbedarf von 55 m<sup>3</sup> wurde hier eingetragen. Eine Warmwasserzirkulation ist im Gebäude nicht vorhanden, weshalb sie nicht aktiviert wurde. Das Lastprofil wird automatisch aus dem angegebenen Jahresbedarf berechnet.

Die folgende Abbildung 25 stellt die Einstellungen des Gebäudes dar.



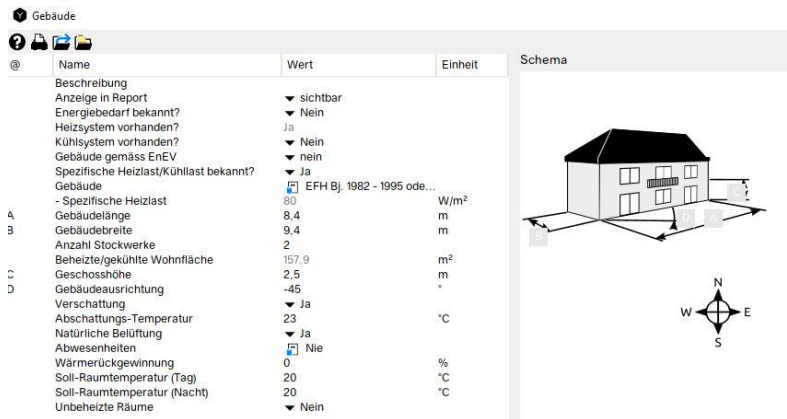


Abbildung 25 Einstellung des Gebäudes in PolySun (Vela Solaris, 2023)

Da über die Gebäudehülle keine genauen Daten vorlagen, wird zur Gebäudedefinition eine Vorlage eines Einfamilienhauses aus PolySun verwendet. Ausgewählt wurde die Vorlage nach der spezifischen Heizlast, die bereits zur Bestimmung der Gebäudeheizlast genutzt wurde ( $80 \frac{W}{m^2}$ ).

Entsprechend gewählt wurde die Vorlage „EFH Bj. 1982 – 1995 oder teilsaniertes älteres Gebäude“. Weitere Gebäudedaten wie z.B. Gebäuelänge, -Breite wurden den Abbildungen 21 und 22 entnommen und entsprechend eingetragen. Die Simulationen werden bei Soll-Raumtemperatur (Tag und Nacht) 20°C und bei 25°C durchgeführt. Unbeheizte Räume sind nicht vorhanden.

Die folgende Abbildung 26 stellt die Einstellungen der elektrischen Verbraucher im Gebäude dar.

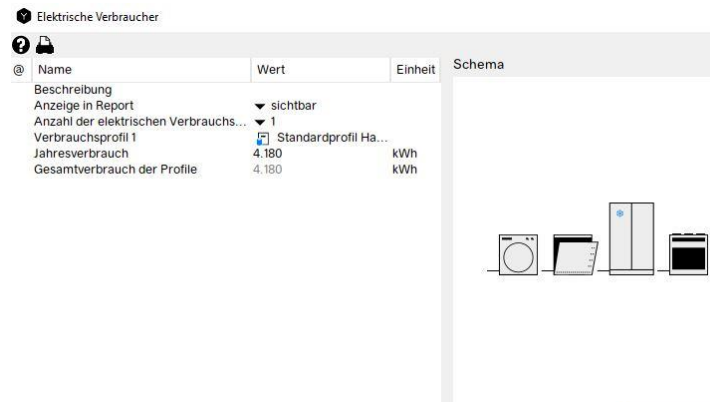


Abbildung 26 Einstellung der elektrischen Verbraucher in PolySun (Vela Solaris, 2023)

Hier wurde der Mittelwert des Stromverbrauchs der Jahre 2020-2022 aus Tabelle 5 gebildet und in PolySun eingetragen. Als Lastprofil wurde ein Standardprofil für den Haushalt gewählt.

In Abbildung 27 sind die Einstellungen am öffentlichen Stromnetz aufgeführt. Das Gebäude ist an dem herkömmlichen Dreiphasen (230 V/400 V/50 Hz) Stromnetz angeschlossen.

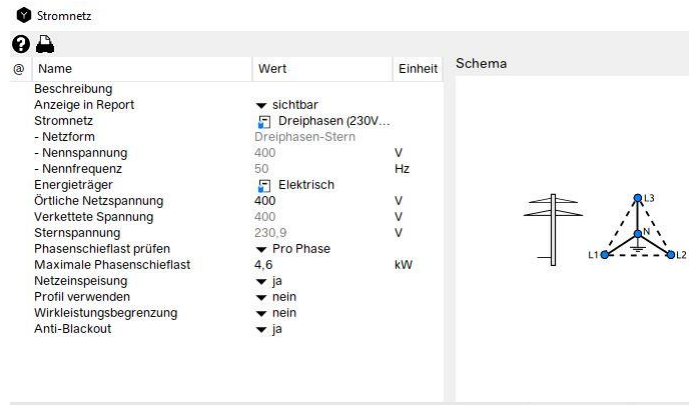


Abbildung 27 Einstellungen des öffentlichen Stromnetzes (Vela Solaris, 2023)

In der folgenden Abbildung 28 sind die Einstellungen der Heizkörper in PolySun dargestellt.

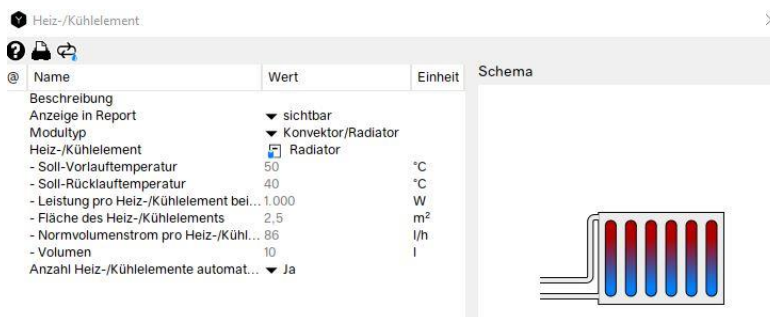


Abbildung 28 Einstellung der Heizkörper in PolySun (Vela Solaris, 2023)

Im ausgewählten Gebäude sind Flachheizkörper verbaut. Da PolySun nur die Auswahl zwischen Radiatoren und Konvektoren erlaubt, wurde sich für die Einstellung „Radiator“ entschieden, da Flachheizkörper genau wie Radiatoren ihre Wärmeleistung vorzugsweise über Strahlung abgeben (vgl. Laasch & Laasch, 2013: S. 711, 722). Die Anzahl der Heizkörper wird automatisch von PolySun berechnet. Im Zuge der Simulation der Anlagenvariationen wird die eingestellte Soll-Vorlauftemperatur stufenweise von 50 auf 60°C erhöht.

### 3.4 Anlagenvariante 1 – Einbau Wärmepumpe

Die fossile Heizungsanlage des Gebäudes wird nun durch eine Luft/Wasser-Wärmepumpe ersetzt. In der folgenden Abbildung 29 ist das Anlagenschema aus PolySun dargestellt.

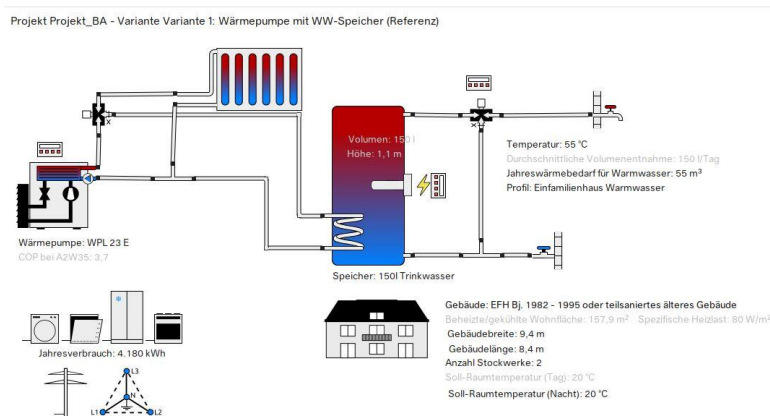


Abbildung 29 Anlagenschema mit Wärmepumpe und Warmwasserspeicher (Vela Solaris, 2023)

In Abbildung 30 sind die Einstellungsmöglichkeiten der Wärmepumpe dargestellt.

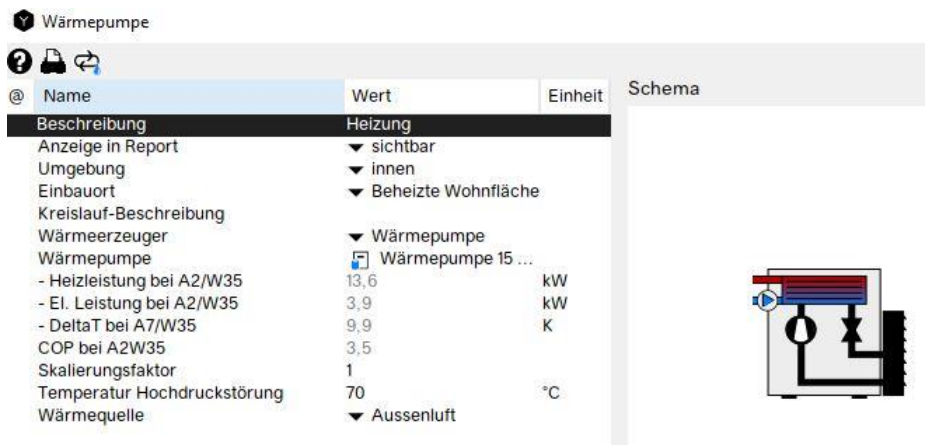


Abbildung 30 Einstellungen einer Wärmepumpe in PolySun (Vela Solaris, 2023)

In PolySun gibt es die Möglichkeit aus einem breiten Katalog an Wärmepumpen auszuwählen. Im Zuge dieser Anlagenvariante werden 3 Wärmepumpen unterschiedlicher Hersteller ausgewählt. Eine monoenergetische Betriebsweise ist möglich, da die meisten Wärmepumpen bereits einen internen Heizstab mit einer Leistung von 6 – 9 kW integriert haben. Da es sich hier um eine Luft/Wasser-Wärmepumpe handelt, wird die Wärmequelle Außenluft ausgewählt.

In Tabelle 6 sind die ausgewählten Wärmepumpen dargestellt. Ausgewählt werden die Wärmepumpen nach den Heizleistungen bei Betriebspunkt A-7/W50, da dieser Betriebspunkt am nächsten an der Norm-Außentemperatur liegt. Um eine weitestgehende monovalente Betriebsweise zu gewährleisten, muss die Leistung der Wärmepumpe bei der Norm-Außentemperatur dem Heizbedarf des Gebäudes entsprechen.

Dabei werden auch Wärmepumpen ausgewählt, welche die benötigte Heizlast nicht komplett abdecken, um den Unterschied zwischen der monovalenten und monoenergetischen Betriebsweise simulieren zu können. Die Bivalenzpunktbestimmung nach Kapitel 2.1.5 (siehe Anhang) wurde beispielhaft für die Wärmepumpe von Stiebel Eltron durchgeführt. Sie kann mit einer Vorlauftemperatur von 50°C monovalent betrieben werden.

Tabelle 6 Leistungsangaben der ausgewählten Wärmepumpen (Vela Solaris, 2023)

Hersteller	Modell	Leistung bei A-7/W50 [kW]	Leistung Heizstab [kW]	COP bei A2/W35
Stiebel Eltron	WPL 23 E	13,68	8,8	3,7
Brötje	BLW – Split 16	11,05	Keine Angabe	3,7
Buderus	WPL 110 I	8,7	6,0	3,1

### 3.5 Anlagenvariante 2 – Einbau Wärmepumpe mit PV-Anlage

Die eingebaute Wärmepumpe soll nun durch eine PV-Anlage mit Stromspeicher unterstützt werden, welche den Netzbezug durch Eigenstromverbrauch verringern soll. In Abbildung 31 ist das Anlagenschema der Wärmepumpe mit PV-Anlage dargestellt.

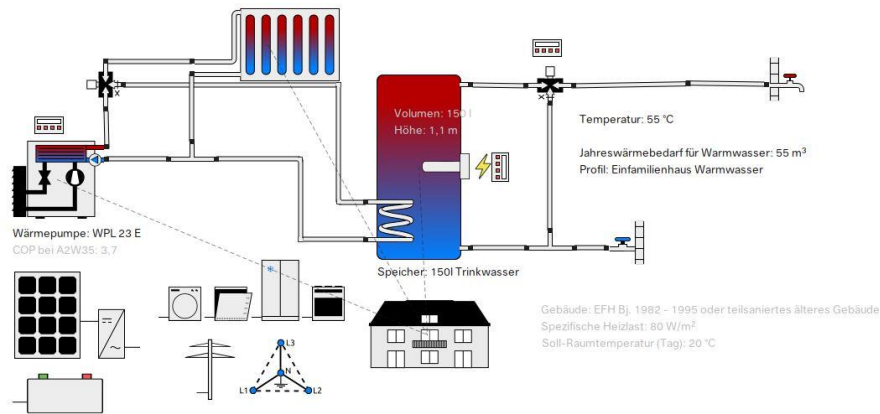


Abbildung 31 Anlagenschema Variante 2 Wärmepumpe mit PV-Anlage und Stromspeicher (Vela Solaris, 2023)

Für die PV-Anlage ist eine Vollbelegung der südwestlichen Dachfläche angestrebt. Auf die Belegung der anderen Fläche wird aufgrund der Verschattung eines dort sitzenden Schornsteines verzichtet.

Die Fläche und die Neigung des Daches der Südwestseite wird nach den angegebenen Maßen in Abbildung 21 und 22 berechnet. Ausgewählt wurden PV-Module des Herstellers Trina Modell TSM-440NEG9R (Vertex S+) à  $440 W_p$ . Insgesamt werden 14 Module installiert woraus sich eine Gesamtleistung von  $6,16 kW_p$  ergibt. Eine genaue Rechnung zur Auslegung ist im Anhang aufgeführt. Die Auslegung des Wechselrichters wurde mithilfe des Wizards in PolySun automatisch durchgeführt. Der zusätzliche Stromspeicher wird mittels AC-Kopplung installiert. In folgender Tabelle 7 ist aufgelistet welcher Speicher ausgewählt wurde und welche Kapazitäten jeweils simuliert werden. Die Auswahl der Kapazitäten richtet sich nach einer Faustformel entwickelt von der Forschungsgruppe Solarspeichersysteme der Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin (vgl. Orth et al., 2022).

- 1,5 kWh Kapazität pro 1 kW PV-Leistung -> bei 6 kW<sub>p</sub> PV-Leistung sollten 9 kWh Speicherkapazität angestrebt werden
- 1,5 kWh Kapazität pro 1000 kWh/a Verbrauch -> bei ca. 10 MWh Gesamt-Stromverbrauch sollten 10,5 kWh Speicherkapazität angestrebt werden

Tabelle 7 Ausgewählter Speicher und dessen Kapazität mit Batteriewechselrichter SMA Sunny Boy Storage 5.0-10 (Vela Solaris, 2023)

Hersteller	Modell	Kapazität [kWh]
<b>Ohne Stromspeicher</b>	-	-
<b>Fenecon</b>	B-Box 2.5	2,5
<b>Fenecon</b>	B-Box 5.0	5,0
<b>Fenecon</b>	B-Box 7.5	7,5
<b>Fenecon</b>	B-Box 10.0	10,0

### 3.6 Anlagenvariante 3 – Einbau Wärmepumpe mit PV-Anlage und Speichersystem

In dieser Variante soll, die bereits durch eine PV-Anlage mit Stromspeicher erweiterte, Wärmepumpe zusätzlich durch einen Pufferspeicher unterstützt werden, welcher thermische

Energie speichert. Ziel ist die Entkopplung von Wärmeerzeugung und -verbrauch. In Abbildung 32 ist das Anlagenschema mit einem zusätzlichen Pufferspeicher dargestellt.

Projekt Projekt\_BA - Variante Variante 4: Raumheizung + Trinkwarmwasser (Photovoltaik + Wärmepumpe + Speicherüberhöhung)

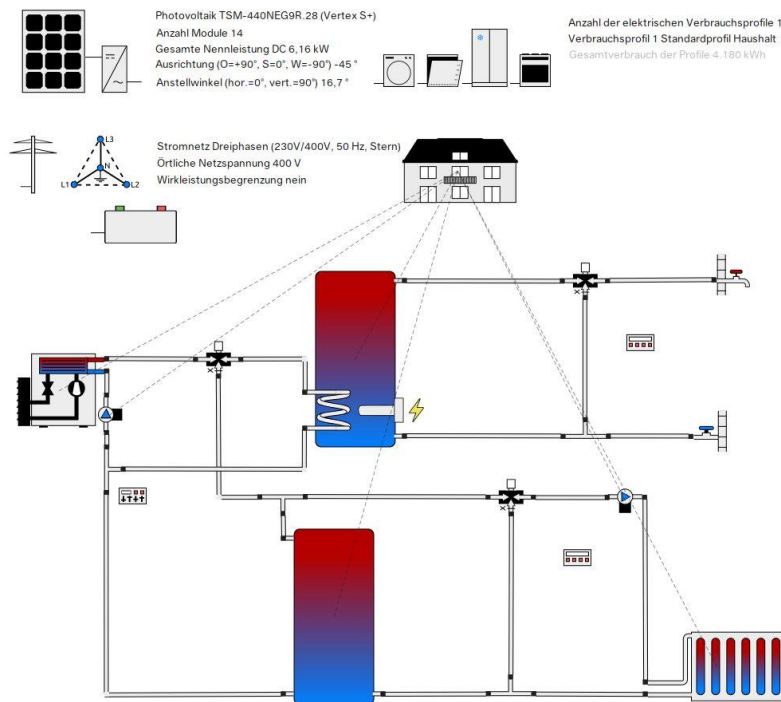


Abbildung 32 Anlagenschema Wärmepumpe mit PV-System und Pufferspeicher (Vela Solaris, 2023)

Simuliert werden in dieser Variante mehrere Pufferspeicher unterschiedlicher Größen, welche in Tabelle 8 aufgeführt sind. Im Pufferspeicher ist kein Heizstab verbaut. Die Auswahl der Speichervolumen richtet sich nach der in Kapitel 2.3.2 genannten Faustformel. Es wird von einer Heizleistung von 13,68 kW (Stiebel Eltron WPL 23 E) ausgegangen.

Tabelle 8 Ausgewählte Speicher mit deren Speichervolumen (Vela Solaris, 2023)

Bezeichnung in PolySun	Hersteller	Speichergröße in [L]
300 l Muster für Wärmepumpe	Anonym	300
500 l Puffer	Anonym	500
700 l Puffer	Anonym	700
1000 l Puffer	Anonym	1.000

## 4 Auswertung der Simulation

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Simulationen dargestellt, diskutiert und bewertet.

### 4.1 Bewertung der Anlagenvariante 1

In den folgenden Tabellen 9-11 sind die Simulationsergebnisse der ausgewählten Wärmepumpen bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen und Soll-Raumtemperatur 20°C dargestellt. Der Stromverbrauch bezieht sich nur auf die Wärmepumpe. Ein positives Energiedefizit bedeutet es herrscht ein Energieüberschuss. Ein negatives Energiedefizit bedeutet, dass zu wenig Energie verfügbar war.

Tabelle 9 Thermische Ergebnisse bei Vorlauftemperatur 50°C

Wärme-pumpe	SJAZ	Stromverbrauch [kWh]	Nutz-energie [kWh]	Energie-bedarf [kWh]	Erzeugte Wärme-energie [kWh]	Energie-defizit [kWh]
Stiebel Eltron	3,47	6.264	21.741	21.665	22.327	31,60
Brötje	3,37	6.393	21.538	21.457	22.120	30,10
Buderus	2,99	7.159	21.384	21.303	21.966	30,30

Tabelle 10 Thermische Ergebnisse bei Vorlauftemperatur 55°C

Wärme-pumpe	SJAZ	Stromverbrauch [kWh]	Nutz-energie [kWh]	Energie-bedarf [kWh]	Erzeugte Wärme-energie [kWh]	Energie-defizit [kWh]
Stiebel Eltron	3,42	6.360,00	21.721,00	21.644,00	22.311,00	31,40
Brötje	3,28	6.549,00	21.506,00	21.425,00	22.093,00	30,00
Buderus	2,93	7.297,00	21.374,00	21.294,00	21.963,00	30,20

Tabelle 11 Thermische Ergebnisse bei Vorlauftemperatur 60°C

Wärme-pumpe	SJAZ	Stromverbrauch [kWh]	Nutz-energie [kWh]	Energie-bedarf [kWh]	Erzeugte Wärme-energie [kWh]	Energie-defizit [kWh]
Stiebel Eltron	3,39	6.417,00	21.731,00	21.655,00	22.317,00	31,30
Brötje	3,25	6.633,00	21.527,00	21.447,00	22.116,00	30,10
Buderus	2,90	7.360,00	21.352,00	21.271,00	21.946,00	30,10

In den folgenden Tabellen sind die Simulationsergebnisse der ausgewählten Wärmepumpen bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen und Soll-Raumtemperatur 25°C dargestellt.

Tabelle 12 Thermische Ergebnisse bei Vorlauftemperatur 50°C

Wärme-pumpe	SJAZ	Stromverbrauch [kWh]	Nutz-energie [kWh]	Energie-bedarf [kWh]	Erzeugte Wärme-energie [kWh]	Energie-defizit [kWh]
Stiebel Eltron	3,38	8.863,00	29.963,00	29.885,00	30.444,00	24,50
Brötje	3,19	9.375,00	29.902,00	29.820,00	30.388,00	23,40
Buderus	2,89	10.349,00	29.875,00	29.794,00	30.355,00	23,80

Tabelle 13 Thermische Ergebnisse bei Vorlauftemperatur 55°C

Wärme-pumpe	SJAZ	Stromverbrauch [kWh]	Nutz-energie [kWh]	Energie-bedarf [kWh]	Erzeugte Wärme-energie [kWh]	Energie-defizit [kWh]
Stiebel Eltron	3,31	9.062,00	29.959,00	29.881,00	30.453,00	24,60

Brötje	3,11	9.617,00	29.901,00	29.820,00	30.395,00	23,40
Buderus	2,83	10.555,00	29.859,00	29.778,00	30.349,00	23,70

Tabelle 14 Thermische Ergebnisse bei Vorlauftemperatur 60°C

Wärme-pumpe	SJAZ	Stromverbrauch [kWh]	Nutz-energie [kWh]	Energie-bedarf [kWh]	Erzeugte Wärme-energie [kWh]	Energie-defizit [kWh]
Stiebel Eltron	3,27	9.148,00	29.948,00	29.870,00	30.438,00	24,60
Brötje	3,07	9.720,00	29.889,00	29.808,00	30.385,00	23,50
Buderus	2,80	10.656,00	29.848,00	29.767,00	30.344,00	23,60

Aus den Simulationsergebnissen lässt sich erkennen, dass aufgrund des stetig vorliegenden positiven Energiedefizits bzw. Energieüberschusses jede der ausgewählten Wärmepumpen in der Lage ist den Energiebedarf des Gebäudes zu decken. Es fällt auf, dass die ausgewählten Wärmepumpen oder die Änderung der Vorlauftemperatur zwischen 50-60°C keinen wesentlichen Einfluss auf den Energiebedarf haben. Wird jedoch die Soll-Raumtemperatur von 20°C auf 25°C erhöht, so erhöht sich der Energiebedarf und die überschüssige Energie verringert sich aufgrund dessen. Die System-Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen liegen allesamt innerhalb des typischen Bereichs für Luft/Wasser-Wärmepumpen von 2,5-3,5 (vgl. Glaesmann, 2022: S. 32).

In der folgenden Abbildung 33 ist die Veränderung des Energiedefizits in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur und Soll-Raumtemperatur dargestellt.

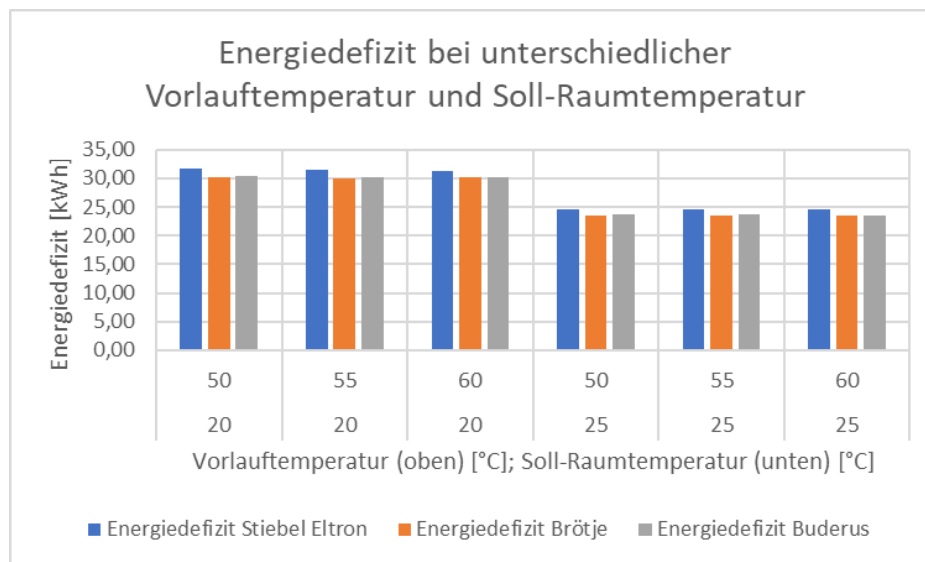


Abbildung 33 Veränderung des Energiedefizits bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen und Soll-Raumtemperaturen (eigene Darstellung)

Die folgende Abbildung 34 stellt die Veränderung des Energiebedarfs in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur und Soll-Raumtemperatur dar.

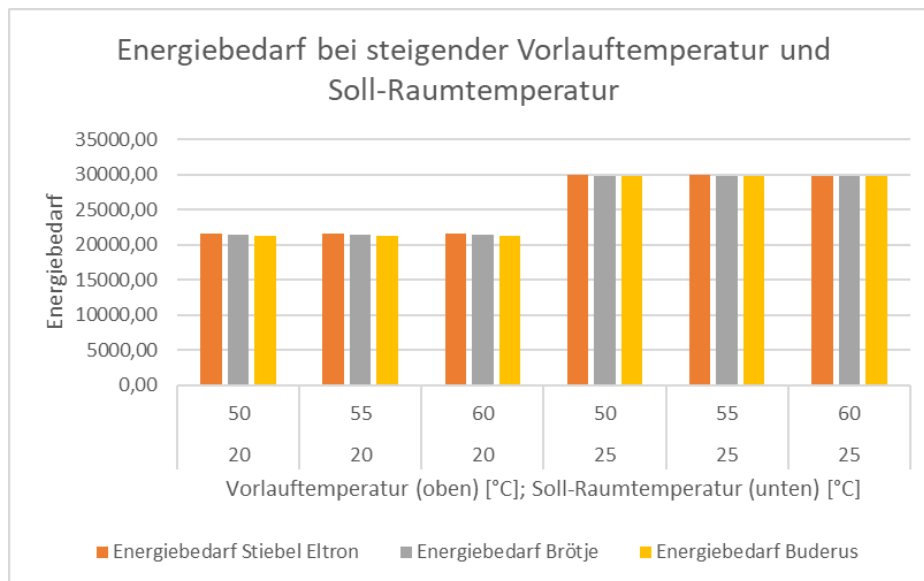


Abbildung 34 Veränderung des Energiebedarfs bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen und Soll-Raumtemperaturen (eigene Darstellung)

Die folgende Abbildung 35 stellt den Stromverbrauch der Wärmepumpen bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen und Soll-Raumtemperaturen dar.

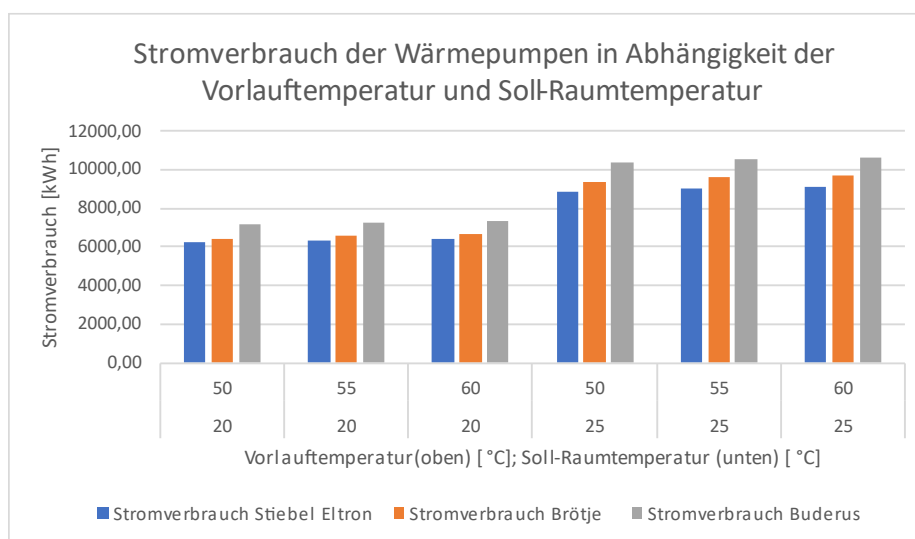


Abbildung 35 Stromverbrauch in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur und Soll-Raumtemperatur (eigene Darstellung)

Die Wärmepumpe Buderus WPL 110-I hat wie erwartet den höchsten Stromverbrauch, da aufgrund der geringeren Heizleistung bei Norm-Außentemperatur der interne Elektroheizstab öfter unterstützen muss. Eine Erhöhung der Vorlauftemperatur hat einen geringen Einfluss auf den Stromverbrauch, während eine Steigerung der Soll-Raumtemperatur aufgrund des gestiegenen Energiebedarfs eine starke Erhöhung des Stromverbrauchs zur Folge hat. Zudem gab PolySun die Warnung „Maximale Anzahl Einschaltungen überschritten“ aus. Dies trat bei der Wärmepumpe von Stiebel Eltron bei allen Vorlauftemperaturen unter Soll-Raumtemperatur von 25°C auf. Bei den anderen beiden Wärmepumpen trat diese Warnung bei allen Simulationen auf. Die viele Anzahl an Einschaltungen können hier ebenfalls einen großen Beitrag zum Stromverbrauch darstellen.



Um die Frage der Wirtschaftlichkeit zu beantworten, müssen sich die Betriebskosten der Wärmepumpe angeschaut werden. Zu einer vollständigen Wirtschaftlichkeitsprüfung zählen ebenfalls die Investitionskosten und die Amortisationszeit, welche jedoch zur Vereinfachung erst in Kapitel 4.4 betrachtet werden. In der folgenden Abbildung 36 ist die Entwicklung der Stromkosten der Wärmepumpe in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur und Soll-Raumtemperatur dargestellt. Berechnet wurden die Stromkosten nach Gleichung (6) aus Kapitel 2.4 ausgehend von einem aktuellen Strompreis von  $42,26 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$  (Statistisches Bundesamt, 2023).

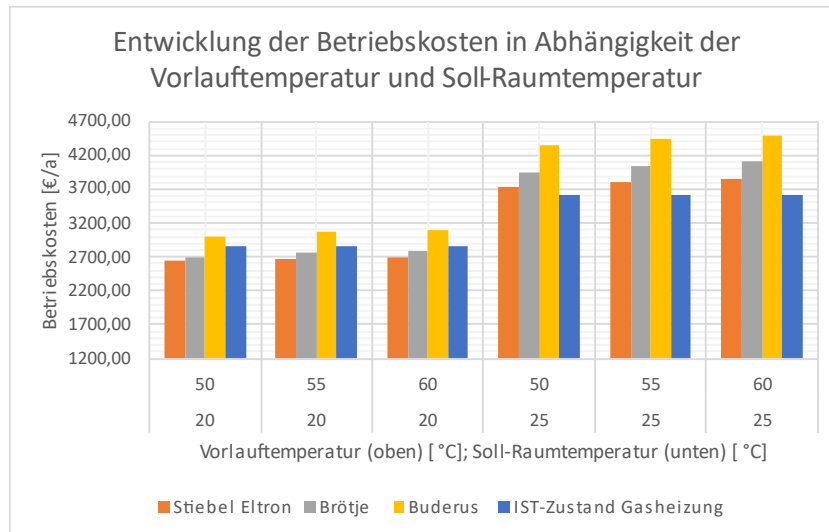


Abbildung 36 Entwicklung der Stromkosten in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur und Soll-Raumtemperatur bei aktuellem Haushaltsstrompreis von  $42,26 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$  (eigene Darstellung)

Nach Abbildung 36 sind die Wärmepumpen von Stiebel Eltron und Brötje mit Stromkosten bei einer Vorlauftemperatur von  $50^{\circ}\text{C}$  und einer Soll-Raumtemperatur von  $20^{\circ}\text{C}$  mit  $2.638,51 \text{ €}$  und  $2690,72 \text{ €}$  am günstigsten im Betrieb. Die Wärmepumpe von Buderus ist aufgrund des übermäßigen Einsatzes des Elektroheizstabes wesentlich teurer mit Stromkosten von  $3.010,92 \text{ €}$ .

Der Vergleich mit dem Brennstoffverbrauch des IST-Zustandes, aufgeführt in Tabelle 4, Kapitel 3.3, zeigt auf, dass sich der Einsatz der Stiebel Eltron WPL 23 E und der Brötje BLW Split-16 wirtschaftlich rechnen würde. Der Einsatz dieser beiden Wärmepumpen ist bei Soll-Raumtemperatur  $20^{\circ}\text{C}$  und der Vorlauftemperatur  $50^{\circ}\text{C}$  besonders wirtschaftlich. Mit der Stiebel Eltron WPL 23 E ließen sich die Heizkosten um bis zu 8% verringern. Eine Steigerung der Vorlauftemperatur auf  $60^{\circ}\text{C}$  wäre möglich und würde noch eine Heizkostenverringerung um 6% im Vergleich zum IST-Zustand erwirken. Wird die Soll-Raumtemperatur auf  $25^{\circ}\text{C}$  erhöht, übersteigen die Betriebskosten der Wärmepumpe die des IST-Zustands.

Wird für den Betrieb der Wärmepumpe ein sogenannter Wärmepumpentarif genutzt, lassen sich die Heizkosten noch weiter senken. Ausgehend von diversen Vergleichsportalen wie z.B. Check24.de beträgt der aktuelle Strompreis nach Wärmepumpentarif ca.  $22 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$ .

In Abbildung 37 ist die Entwicklung der Betriebskosten bei einem Wärmepumpentarif von  $0,22 \text{ €/kWh}$  dargestellt.

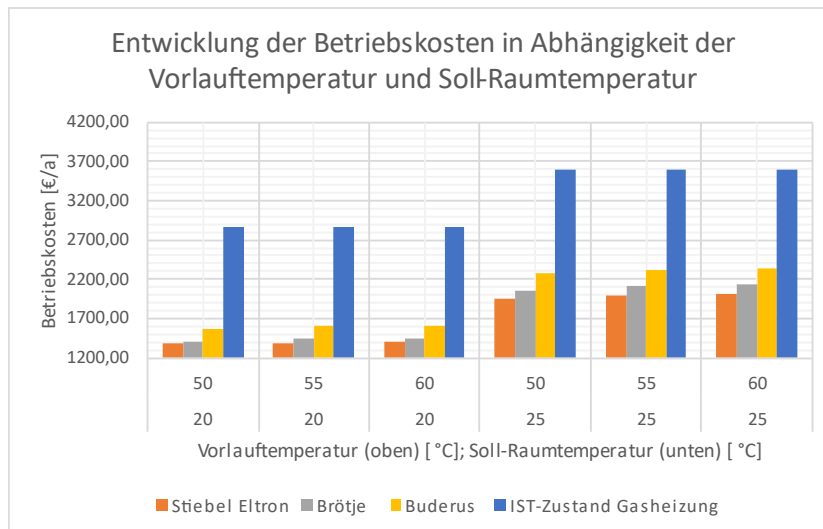


Abbildung 37 Entwicklung der Betriebskosten in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur und Soll-Raumtemperatur bei aktuellem Wärmepumpentarif von 22,00 Cent/kWh (eigene Darstellung)

Werden die Betriebskosten der Wärmepumpe nun mit dem Brennstoffkosten des IST-Zustands verglichen, so werden hohe Einsparungen gegenüber des IST-Zustandes möglich.

Mit der Stiebel Eltron WPL 23 E ist eine Heizkosteneinsparung von bis zu 52% möglich. Dies entspricht Betriebskosten von 1.373,57€. Soll die Raumtemperatur auf 25°C angehoben werden, so ist dies ebenfalls wirtschaftlich aufgrund einer immer noch hohen Einsparung von 46%, was Betriebskosten von 1.945,18€ entspricht.

Für diese Anlagenvariation empfiehlt sich aufgrund der Datenlage der Einsatz der Stiebel Eltron WPL 23 E. Sie lässt sich wirtschaftlich bei allen getesteten Vorlauftemperaturen mit Einsparungen gegenüber des IST-Zustands betreiben. Sollte den Bewohnern im Gebäude 20°C Raumtemperatur zu kalt sein, ließe sich diese unter weiterhin vorliegenden Heizkosteneinsparungen auf bis zu 25°C erhöhen.

#### 4.2 Bewertung der Anlagenvariante 2

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse der Photovoltaikanlage aus Anlagenvariante 2 dargestellt. Auf eine erneute Darstellung der thermischen Ergebnisse der Wärmepumpe wird verzichtet, da diese durch den Einbau der Photovoltaikanlage nicht beeinflusst werden und sich nicht signifikant verändern. Die Photovoltaikanlage liefert lediglich erzeugten Strom an die Wärmepumpe, um deren Netzbezug zu verringern. Kleine Änderungen sind durch die dynamischen Wetterdaten zu erklären.

In der folgenden Tabelle 15 sind die Ergebnisse der Anlagenkombination Wärmepumpe WPL 23 E von Stiebel Eltron mit Photovoltaikanlage und Stromspeicher in Zeitraum von einem Jahr bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 20°C dargestellt.

Tabelle 15 Ergebnisse der Photovoltaikanlage bei verschiedenen Stromspeicherkapazitäten mit Wärmepumpe Stiebel Eltron WPL 23 E bei einem PV-Jahresertrag (AC) von 5413,5 kWh (eigene Darstellung)

Kapazität [kWh]	Autarkie-grad [%]	Batterie-entladeenergie [kWh]	SJAZ [-]	Eigenverbrauch [kWh]	Netzeinspeisung [kWh]	Eigenverbrauchsverhältnis [kWh]

<b>0,00</b>	18,30	0,00	3,67	1.906,00	3.508,00	35,20
<b>2,50</b>	26,10	849,00	3,67	2.843,00	2.570,00	52,50
<b>5,00</b>	30,90	1.339,00	3,67	3.398,00	2.015,00	62,80
<b>7,50</b>	33,60	1.618,00	3,67	3.712,00	1.702,00	68,60
<b>10,00</b>	34,70	1.727,00	3,67	3.834,00	1.580,00	70,80

Simuliert wurde die Photovoltaikanlage mit Stromspeicher ebenfalls mit den in Kapitel 4.1 aufgeführten Wärmepumpen von Buderus und Brötje. Die Ergebnisse (siehe Anhang) werden hier jedoch nicht aufgeführt, da diese sich genau wie die Ergebnisse der Stiebel Eltron aus Tabelle 15 entwickeln. Ein höherer Stromverbrauch durch eine zu kleine Wärmepumpe, einer Erhöhung der Vorlauftemperatur oder Erhöhung der Soll-Raumtemperatur von 20°C auf 25°C führt aufgrund des erhöhten Strombedarfes zu einer Absenkung des Autarkiegrades.

Die System-Jahresarbeitszahl (SJAZ) verbesserte sich durch den Einbau einer Photovoltaikanlage über alle simulierten Wärmepumpen und eingestellten Temperaturen im Vergleich zu den SJAZ-Werten aus Anlagenvariante 1 um 5 – 6% in Kapitel 4.1.

Mit einem Stromspeicher lässt sich die Autarkie des Systems weiter steigern. Bei den Speichergrößen 7,5 kWh und 10 kWh hat sich eine große Steigerung bis Verdopplung des Eigenverbrauchs, des Eigenverbrauchsverhältnisses und des Autarkiegrades herausgestellt.

Welche Speichergröße am besten geeignet ist wurde in Kapitel 3.5 durch eine Faustformel bestimmt. Nach diese Faustformeln sollte ein Speicher mit einer Kapazität von 9 bis 10 kWh am besten geeignet sein. Da ein 9 kWh Speicher des Herstellers Fenecon nicht vorhanden war, wurde die nächstkleinere Größe verwendet. Um beurteilen zu können, wie die verschiedenen Speichergrößen vom System ausgenutzt werden, wurden die Speicher in PolySun mithilfe der grafischen Auswertung näher beleuchtet.

In Abbildung 38 ist der Verlauf des Speicherladezustands im Zeitraum 20. bis 27. August bei einer Speicherkapazität von 7,5 kWh dargestellt.

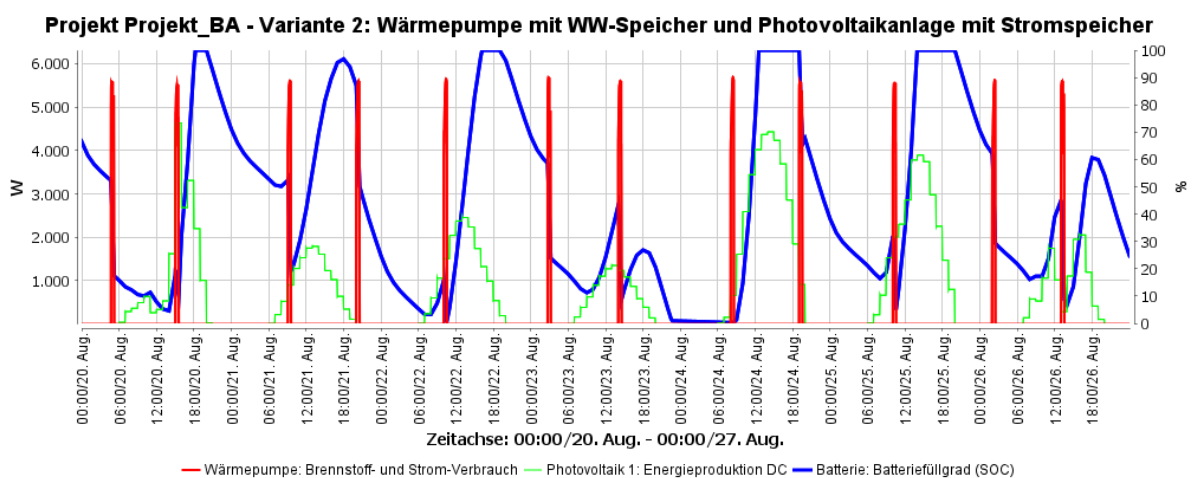


Abbildung 38 Verlauf der Speicherladezustandst einer Fenecon B-Box 7.5 mit einer Speicherkapazität von 7,5 kWh im Zeitraum 20. bis 27. August (Vela Solaris, 2023)

Es fällt auf, dass der Speicher bei guter Sonneneinstrahlung an einem Tag vollgeladen werden kann. Der Speicher wird regelmäßig morgens, abends und nachts durch die Wärmepumpe

entladen. Die gespeicherte Energie reicht aus, um eine Taktung der Wärmepumpe abzudecken wie z.B. am 20. August kurz vor 6 Uhr. Lediglich in der Nacht vom 23. bis zum 24. August hat die gespeicherte Energie nicht ausgereicht, da gegen Mittag die Wärmepumpe einmal angesprungen ist weshalb der Speicher nicht weiter beladen wurde. Eine Erhöhung der Speicherkapazität auf 10 kWh würde dafür sorgen, dass mehr gespeicherte Energie zur Verfügung steht an Tagen mit einem höheren Strombedarf, siehe Abbildung 39 (Diagramm mit 10 kWh Speicher). Jedoch sind an allen anderen Tagen, an denen der Stromverbrauch nicht so hoch ist, noch ca. 30% der Speicherkapazität ungenutzt. Anhand dessen wäre in diesem Fall der Speicher mit einer Kapazität von 7,5 kWh am besten geeignet, da hier der am Tag gespeicherte Strom nahezu komplett aufgebraucht wird und nicht ungenutzt gespeichert wird.

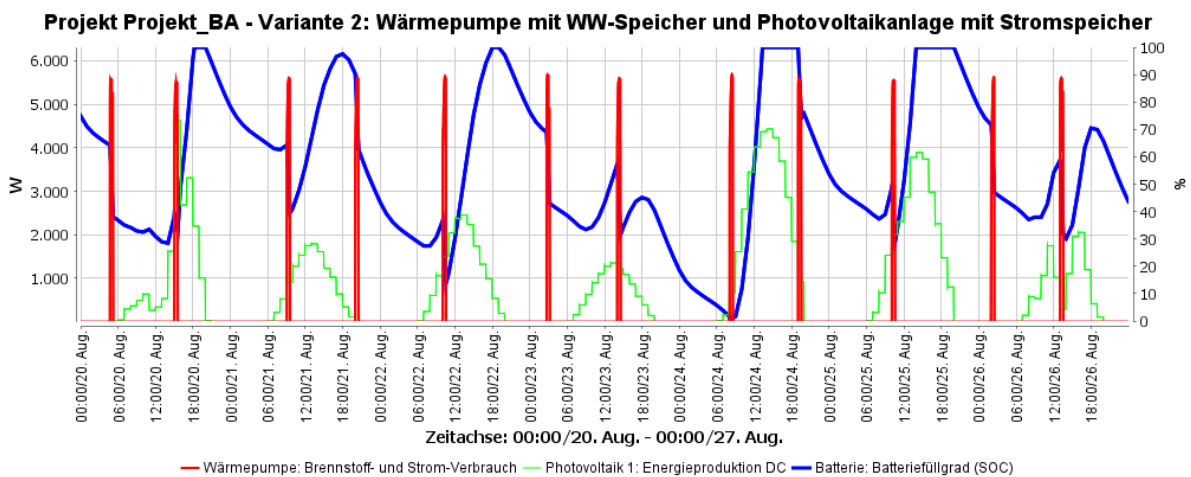


Abbildung 39 Verlauf des Speicherladezustands einer Fenecon B-Box 10.0 mit einer Speicherkapazität von 10 kWh im Zeitraum 20. bis 27. August (Vela Solaris, 2023)

Mithilfe der Photovoltaikanlage und Stromspeicher lässt sich das Wärmepumpensystem vor allem in den Sommermonaten nahezu autark betreiben. Hervorzuheben ist hier der Zeitraum Mai bis September mit Autarkiespitzenwerten von nahezu 100%. Der Juni ist der stärkste Monat mit einem Autarkiewert von 92,8%. Weiterhin ist die Leistung einer Photovoltaikanlage gegensätzlich zum Nutzungsverhalten einer Wärmepumpe. Gerade in der kälteren Jahreszeit (Januar, Februar, März, Oktober, November und Dezember) erfährt die Wärmepumpe eine höhere Auslastung, welche die Photovoltaikanlage aufgrund des geringen Ertrags nicht abdecken kann. Vor allem der Januar und Dezember sind mit Autarkiewerten von 6,4% und 4,8% besonders niedrig. In Abbildung 40 ist die Entwicklung des Autarkiegrades dargestellt.

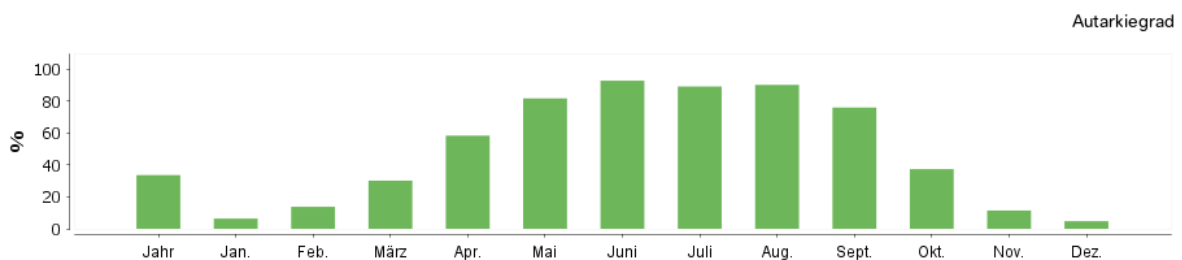


Abbildung 40 Entwicklung des Autarkiegrads innerhalb eines Jahres für jeden Monat (Vela Solaris, 2023)

Eine Installation einer Photovoltaikanlage wird aufgrund der sehr guten Autarkie in den wärmeren Jahreszeiten empfohlen. Damit eine Wärmepumpe jedoch von der Photovoltaikanlage

profitieren kann, muss das korrekte Messkonzept (siehe Kapitel 2.1.6) gewählt werden. Zudem wird darauf hingewiesen, dass die Werte in Abbildung 42 den Mittelwert des entsprechenden Monats darstellen. Nur, weil im Dezember der Autarkiegrad 4,8% beträgt, heißt dies nicht, dass die Photovoltaikanlage in diesen Monaten nicht sinnvoll ist. Trotz des geringeren Ertrags kann die Anlage zumindest tagsüber gute Autarkiewerte erreichen.

In Abbildung 41 ist der Verlauf des Autarkiegrads (hellblau) einer Woche im Dezember dargestellt.

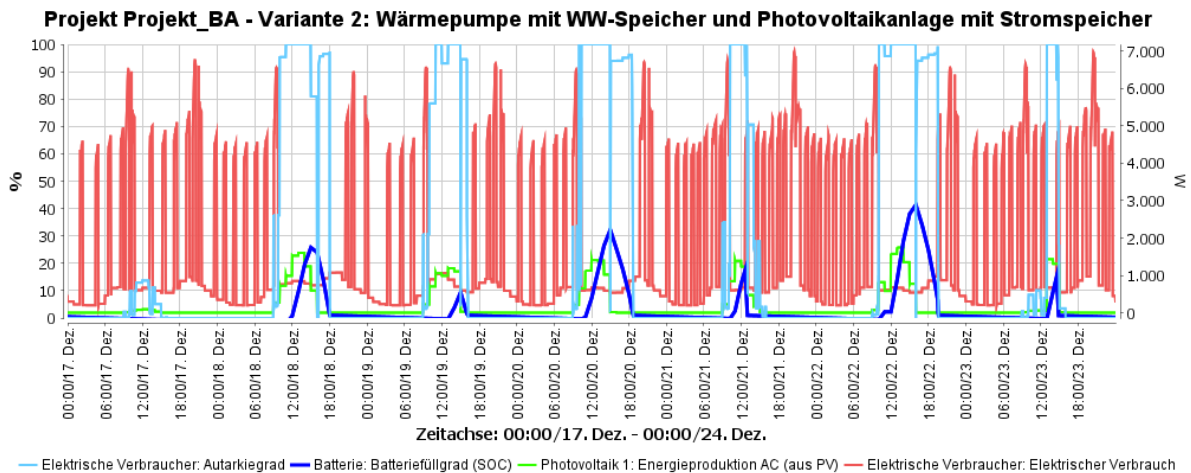


Abbildung 41 Verlauf des Autarkiegrades einer Woche im Dezember (Vela Solaris, 2023)

Die folgende Abbildung 42 stellt die Betriebskosten der Wärmepumpen mit Photovoltaik bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 20°C und 25°C bei Wärmepumpentarif 22  $\frac{ct}{kWh}$  dar. Die Stiebel Eltron WPL 23 E stellt hier mit Betriebskosten von 1298,72 €/a die im Betrieb günstigste Wärmepumpe dar. Der Einsatz einer Photovoltaikanlage senkt die Betriebskosten der Wärmepumpe im Vergleich zu den Betriebskosten aus Variante 1 um 6% (bezogen auf Stiebel Eltron WPL 23 E bei VT50 und Raumtemperatur 20°C). Steigern ließe sich dieser Wert durch Optimierung der Wärmepumpensteuerung durch Verwenden einer Smart-Grid Schnittstelle (SG-Ready). Eine SG-Ready Schnittstelle ermöglicht der Wärmepumpe mit der PV-Anlage zu kommunizieren und überschüssigen PV-Strom besser auszunutzen (vgl. Glaesmann, 2022: S. 117).

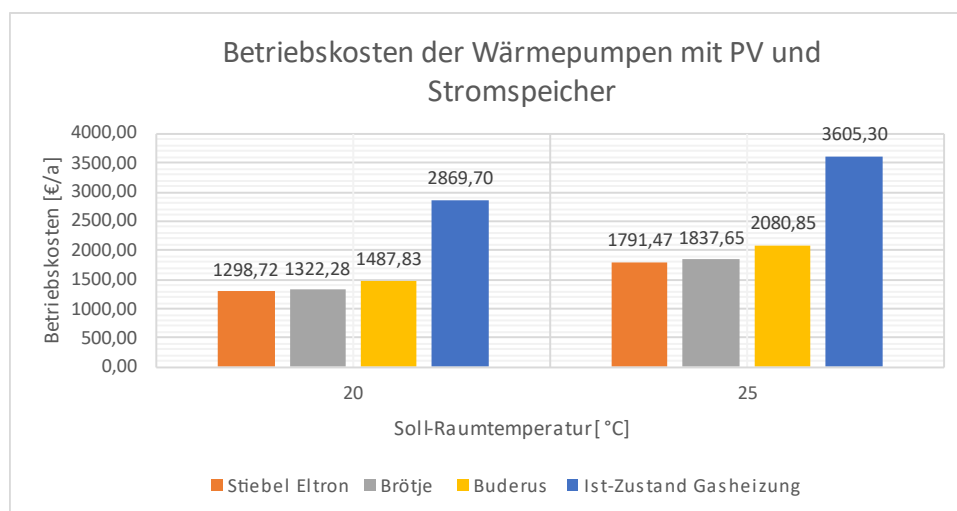


Abbildung 42 Betriebskosten der ausgewählten Wärmepumpen bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 20°C und 25°C. Berechnet mit Wärmepumpentarif 22 Cent/kWh (eigene Darstellung)

### 4.3 Bewertung der Anlagenvariante 3

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse der Anlagenvariante 3 Wärmepumpe Stiebel Eltron WPL 23 E mit Warmwasser-Speicher, Photovoltaikanlage mit Stromspeicher und Pufferspeicher dargestellt. Als Stromspeicher wurde sich für die Fenecon B-Box 7.5 aufgrund der in Anlagenvariante 2 dargelegten Gründe entschieden. Der Einfluss der Photovoltaik ist bereits in der System-Jahresarbeitszahl berücksichtigt.

Die folgenden Tabellen stellen die Simulationsergebnisse bei Soll-Raumtemperatur 20°C dar.

*Tabelle 16 Thermische Ergebnisse der Stiebel Eltron WPL 23 E bei unterschiedlichen Pufferspeichergrößen und Vorlauftemperatur 50°C (eigene Darstellung)*

<b>Pufferspeicher [L]</b>	<b>SJAZ</b>	<b>Stromverbrauch Wärmepumpe [kWh]</b>	<b>Nutzenergie [kWh]</b>	<b>Energiebedarf [kWh]</b>	<b>Erzeugte Wärmeenergie [kWh]</b>
300	2,56	8.018,00	19.979,00	20.063,00	21.555,00
500	2,81	7.410,00	20.111,00	20.203,00	21.211,00
700	2,81	7.404,00	20.071,00	20.162,00	21.256,00
1000	2,80	7.385,00	20.002,00	20.097,00	21.272,00
1200	2,80	7.397,00	19.975,00	20.064,00	21.302,00

*Tabelle 17 Thermische Ergebnisse der Stiebel Eltron WPL 23 E bei unterschiedlichen Pufferspeichergrößen und Vorlauftemperatur 55°C (eigene Darstellung)*

<b>Pufferspeicher [L]</b>	<b>SJAZ</b>	<b>Stromverbrauch Wärmepumpe [kWh]</b>	<b>Nutzenergie [kWh]</b>	<b>Energiebedarf [kWh]</b>	<b>Erzeugte Wärmeenergie [kWh]</b>
300	2,54	8.050,00	19.958,00	20.040,00	21.177,00
500	2,67	7.727,00	20.032,00	20.129,00	21.252,00
700	2,66	7.743,00	19.991,00	20.083,00	21.302,00
1000	2,66	7.742,00	19.911,00	20.000,00	21.344,00
1200	2,65	7.752,00	19.877,00	19.968,00	21.370,00

*Tabelle 18 Thermische Ergebnisse der Stiebel Eltron WPL 23 E bei unterschiedlichen Pufferspeichergrößen und Vorlauftemperatur 60°C (eigene Darstellung)*

<b>Pufferspeicher [L]</b>	<b>SJAZ</b>	<b>Stromverbrauch Wärmepumpe [kWh]</b>	<b>Nutzenergie [kWh]</b>	<b>Energiebedarf [kWh]</b>	<b>Erzeugte Wärmeenergie [kWh]</b>
300	2,53	8.072,00	19.933,00	20.018,00	21.195,00
500	2,60	7.916,00	19.961,00	20.054,00	21.291,00
700	2,59	7.934,00	19.903,00	19.994,00	21.320,00
1000	2,57	7.953,00	19.816,00	19.905,00	21.391,00
1200	2,56	7.973,00	19.776,00	19.866,00	21.414,00

Die folgenden Tabellen stellen die Simulationsergebnisse bei Soll-Raumtemperatur 25°C dar.

*Tabelle 19 Thermische Ergebnisse der Stiebel Eltron WPL 23 E bei unterschiedlichen Pufferspeichergrößen und Vorlauftemperatur 50°C (eigene Darstellung)*

<b>Pufferspeicher [L]</b>	<b>SJAZ</b>	<b>Stromverbrauch Wärmepumpe [kWh]</b>	<b>Nutzenergie [kWh]</b>	<b>Energiebedarf [kWh]</b>	<b>Erzeugte Wärmeenergie [kWh]</b>
300	2,63	11.274,00	28.835,00	28.916,00	29.972,00
500	2,90	10.381,00	29.040,00	29.140,00	29.981,00
700	2,90	10.363,00	28.993,00	29.086,00	29.993,00
1000	2,90	10.343,00	28.911,00	29.002,00	29.997,00
1200	2,89	10.358,00	28.867,00	28.956,00	30.015,00

*Tabelle 20 Thermische Ergebnisse der Stiebel Eltron WPL 23 E bei unterschiedlichen Pufferspeichergrößen und Vorlauftemperatur 55°C (eigene Darstellung)*

<b>Pufferspeicher [L]</b>	<b>SJAZ</b>	<b>Stromverbrauch Wärmepumpe [kWh]</b>	<b>Nutzenergie [kWh]</b>	<b>Energiebedarf [kWh]</b>	<b>Erzeugte Wärmeenergie [kWh]</b>
300	2,62	11.300,00	28.816,00	28.893,00	29.986,00
500	2,77	10.821,00	28.937,00	29.033,00	30.006,00
700	2,76	10.827,00	28.872,00	28.965,00	29.997,00
1000	2,75	10.818,00	28.769,00	28.864,00	30.010,00
1200	2,75	10.827,00	28.726,00	28.816,00	30.022,00

*Tabelle 21 Thermische Ergebnisse der Stiebel Eltron WPL 23 E bei unterschiedlichen Pufferspeichergrößen und Vorlauftemperatur 60°C (eigene Darstellung)*

<b>Pufferspeicher [L]</b>	<b>SJAZ</b>	<b>Stromverbrauch Wärmepumpe [kWh]</b>	<b>Nutzenergie [kWh]</b>	<b>Energiebedarf [kWh]</b>	<b>Erzeugte Wärmeenergie [kWh]</b>
300	2,62	11.311,00	28.776,00	28.859,00	29.976,00
500	2,69	11.059,00	28.821,00	28.918,00	29.996,00
700	2,68	11.074,00	28.748,00	28.845,00	29.993,00
1000	2,66	11.094,00	28.630,00	28.725,00	30.019,00
1200	2,66	11.098,00	28.579,00	28.669,00	30.020,00

Die Ergebnisse der Simulationsergebnisse von der Brötje BLW Split 16 und der Buderus WPL 110 I werden nicht extra aufgeführt, da die Ergebnisse nicht groß von den Ergebnissen der Stiebel Eltron WPL 23 E abweichen. Zudem konnte die Simulation der Buderus WPL 110 I nicht durchgeführt werden, da sie bei dieser Anlagenkonfiguration nicht im Anlagenkatalog aufzufinden war. Stattdessen wurde eine andere Wärmepumpe mit ähnlichen Leistungswerten gewählt. Ersetzt wurde die Buderus WPL 110 I mit der Heliotherm HP12L-K-BC, welche beim Betriebspunkt A-7/W50 eine Heizleistung von 8,2 kW und einen COP von 3,07 bei A2/W35 besitzt.

In der folgenden Abbildung 43 sind die System-Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 20°C dargestellt.

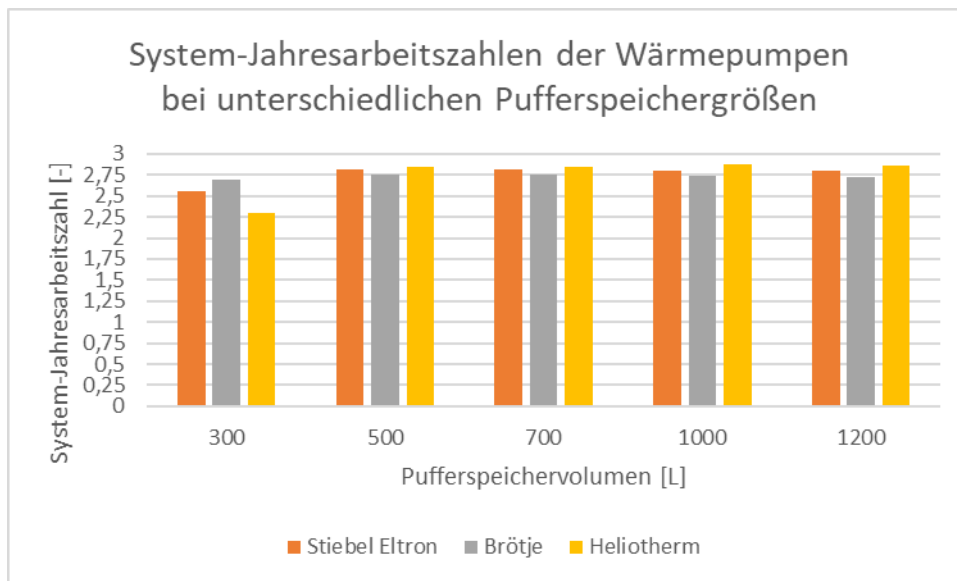


Abbildung 43 System-Jahresarbeitszahlen der simulierten Wärmepumpen bei unterschiedlichen Pufferspeichergrößen bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 20°C (eigene Darstellung)

Es ist zu erkennen, dass sich ab einer Pufferspeichergröße von 500 Liter sich der SJAZ nicht signifikant ändert. Aufgrund dessen ist ein Pufferspeicher mit einem Volumen von 500 Litern ausreichend und es können sich zusätzliche Investitionskosten eines größeren Speichers gespart werden.

Lediglich bei einem Pufferspeicher mit 300 Litern Größe verringert sich die Arbeitszahl des Systems. Grund hierfür ist, dass der Speicher zu klein ausgelegt ist und die Wärmepumpe aufgrund mangelnder Wärmeabnahme in die sogenannte Hochdruckstörung übergeht. Die Hochdruckstörung wurde in PolySun als Fehlermeldung „Maximale Fluidtemperatur überschritten“ ausgegeben. Näheres zur Hochdruckstörung ist in Kapitel 2.3.2 beschrieben. Eine Erhöhung des Pufferspeichervolumens ist zur Lösung des Fehlers notwendig.

Zudem sind die Jahresarbeitszahlen mit Pufferspeicher generell niedriger im Vergleich zu den Jahresarbeitszahlen in Anlagenvariante 1 und 2 z.B. betrug die SJAZ bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 20°C bei der Wärmepumpe von Stiebel Eltron bei der 1. Anlagenvariante (Tabelle 9) 3,47, während die SJAZ mit Pufferspeicher nur noch bei 2,8 liegt. Grund hierfür ist das zusätzliche Volumen an Heizwasser, dass durch den Pufferspeicher im System ist. Durch das zusätzliche Heizwasservolumen steigt der Stromverbrauch, da die Wärmepumpe durch Einsatz elektrischer Energie den Pufferspeicher aufheizen muss. Ein weiterer Grund sind auftretende Wärmeverluste am Pufferspeicher, die ausgeglichen werden müssen (vgl. Glaesmann, 2022: S. 244). Zudem trat die Fehlermeldung „Maximale Anzahl Einschaltungen überschritten“ bei keiner der Wärmepumpen über alle Simulationen hinweg nicht mehr auf. Das bedeutet der Pufferspeicher erfüllt seine Aufgabe in der Entkopplung der Wärmeerzeugung und verringert somit das Takten der Wärmepumpe.

Die Folgende Abbildung 44 stellt die Entwicklung der System-Jahresarbeitszahl anhand der Wärmepumpe Stiebel Eltron WPL 23 E in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur, Soll-Raumtemperatur und der Pufferspeichergröße dar. Bei Vorlauftemperatur 60°C und Soll-Raumtemperatur 20°C lässt sich das Absinken der SJAZ bei steigendem Pufferspeichervolumen besonders gut erkennen.



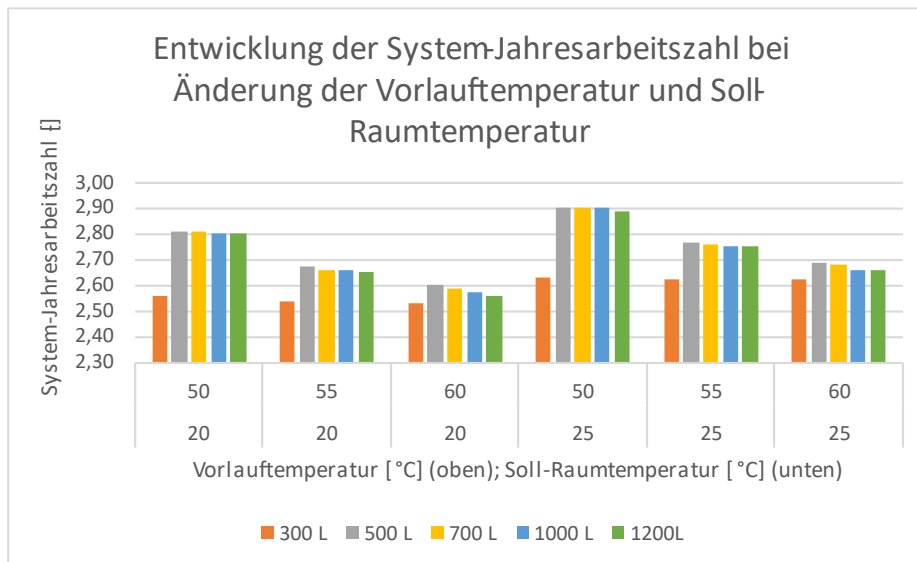


Abbildung 44 Entwicklung der System-Jahresarbeitszahl bei Wärmepumpe Stiebel Eltron WPL 23 E in Abhängigkeit der Raum- und Vorlauftemperatur und Pufferspeichergröße (eigene Darstellung)

Wie bereits in Anlagenvariante 1 aufgeführt, hat eine Erhöhung der Vorlauftemperatur ein Absinken der System-Jahresarbeitszahl aufgrund des gestiegenen Stromverbrauchs der Wärmepumpe zur Folge. Durch Erhöhung der Soll-Raumtemperatur erhöht sich die System-Jahresarbeitszahl. Aufgrund der Darstellung in Abbildung 46 wird empfohlen die Vorlauftemperatur möglichst gering zu halten. Von einem Anheben der Raum-Solltemperatur wird abgeraten, da ansonsten der Stromverbrauch der Wärmepumpe zu stark ansteigt.

In folgender Abbildung 45 sind die Betriebskosten bei Vorlauftemperatur 50°C der Wärmepumpen bei einem Pufferspeichervolumen von 500 Litern bei Wärmepumpentarif  $0,22 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$  dargestellt.

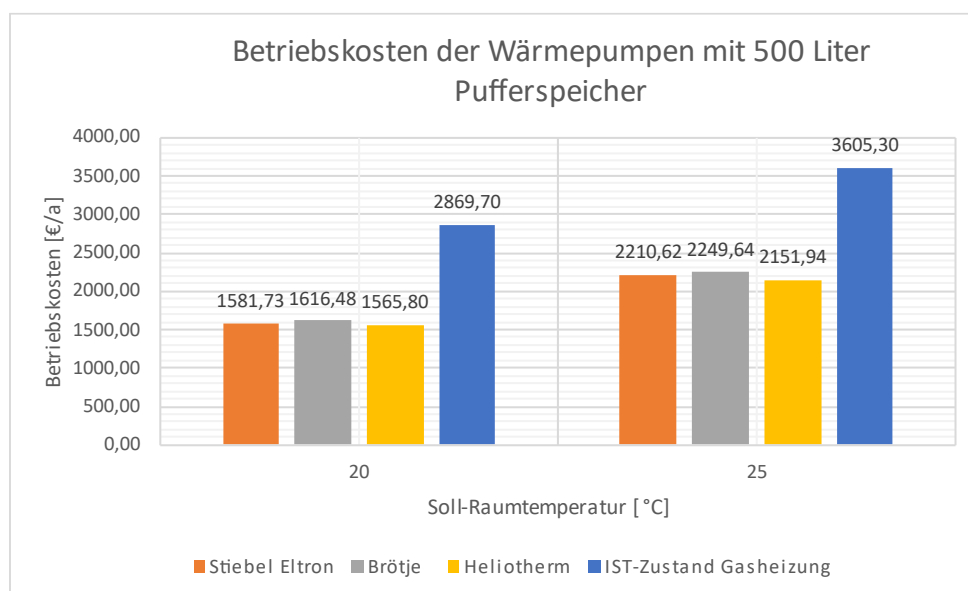


Abbildung 45 Betriebskosten der Wärmepumpen mit Photovoltaik, Stromspeicher und Pufferspeicher mit 500 Liter Volumen bei Soll-Raumtemperatur 20°C und 25°C bei Wärmepumpentarif 0,22 €/kWh (eigene Darstellung)

Nach Abbildung 45 ist der Betrieb einer Wärmepumpe mit Photovoltaikanlage, Stromspeicher und Pufferspeicher mit Einsparungen gegenüber des IST-Zustands wirtschaftlich möglich. Auffällig ist,

dass die Unterschiede in den Betriebskosten der Wärmepumpen gering ausfallen. Vor allem die zu klein ausgelegte Wärmepumpe Heliotherm mit einer Heizleistung von nur 8,2 kW bei dem Betriebspunkt A-7/W50 bei einer Gebäudeheizlast von 12,64 kW hat die geringsten Betriebskosten. Dies kann mehrere Gründe haben wie z.B., dass die Außentemperatur nur in kurzen Zeiträumen bei -7°C oder niedriger liegt. Die Heizleistung der Heliotherm steigt schon bei einer Außentemperatur von 2°C auf 11,2 kW Heizleistung an und reicht somit nahezu aus die Gebäudeheizlast zu decken (Vela Solaris, 2023). Dadurch zeigt sich, dass die Entkopplung von Wärmeerzeugung und Wärmenutzung mit einem Pufferspeicher, den Betrieb von zu klein ausgelegten Wärmepumpen verbessert. Die Wärmepumpe muss dadurch bei niedrigen Außentemperaturen nicht einschalten, da der Pufferspeicher stattdessen entladen werden kann.

#### 4.4 Vergleich der Varianten

Die folgende Tabelle 22 stellt die Betriebskosten aller Wärmepumpen und Anlagenvariationen dar. Es werden nur die Betriebskosten mit eingestellter Vorlauftemperatur von 50°C verglichen, da sich während der Simulationen der Anlagenvarianten herausgestellt hat, dass die Betriebskosten bei dieser Vorlauftemperatur am niedrigsten sind. Als Stromspeicher (7,5 kWh) und Pufferspeicher (500 L) wurden die empfohlenen Größen aus Kapitel 4.2 und 4.3 gewählt. Die niedrigsten Betriebskosten sind grün hervorgehoben. Höhere Betriebskosten sind gelb dargestellt. Die Brennstoffkosten des IST-Zustands stehen zum direkten Vergleich blau markiert in der Tabelle.

*Tabelle 22 Vergleich der Betriebskosten über alle Anlagenvarianten bei Soll-Raumtemperatur (ST) 20°C und 25°C bei Wärmepumpentarif 0,22 €/kWh. Niedrigster Wert in grün, höhere in gelb. Aktueller IST-Zustand in blau (eigene Darstellung)*

Raumtemperatur	Wärmepumpe	Variante 1	Variante 2	Variante 3	IST-Zustand
20	Stiebel Eltron	1.373,57	1.298,72	1.581,73	2.869,70
20	Brötje	1.400,75	1.322,28	1.616,48	2.869,70
20	Buderus	1.567,44	1.487,83	1.565,80	2.869,70
25	Stiebel Eltron	1.945,18	1.791,47	2.210,62	3.605,30
25	Brötje	2.056,55	1.837,65	2.249,64	3.605,30
25	Buderus	2.268,06	2.080,85	2.151,94	3.605,30

Die Anlagenvariante 2 mit der Kombination Wärmepumpe, Photovoltaik und Stromspeicher besitzt die niedrigsten Betriebskosten gefolgt von Variante 1. Die Simulation von Variante 1 und 2 wies jedoch durch Ausgabe des Fehlers „Maximale Anzahl Einschaltungen überschritten“ auf eine hohe Taktung der Wärmepumpe hin. Dieser Fehler trat bei den Wärmepumpen von Brötje und Buderus bei jeder Simulation innerhalb Variante 1 und 2 auf. Bei der Wärmepumpe von Stiebel Eltron trat dieser Fehler erst ab Soll-Raumtemperatur 25°C auf. Ein Hinzufügen eines Pufferspeichers nach Variante 3 verhindert übermäßiges Takten und verlängert somit die Lebenszeit der Wärmepumpe (vgl. Glaesmann, 2022: S. 177). Das Anheben der Soll-Raumtemperatur aus Gründen der Behaglichkeit auf 25°C führt zu einem starken Anstieg der Betriebskosten bei allen Varianten, wobei diese Kosten im Vergleich zu den Betriebskosten des Ist-Zustands (3605,30 €/a bei 25°C) noch immer geringer sind.

Damit die Anlage wirtschaftlich ist, sollte ein Wärmepumpentarif für die Wärmepumpe gewählt werden. Wird der Strombezug der Wärmepumpe über den herkömmlichen Haushaltsstromtarif versorgt, wird nahezu jede Anlagenvariante unrentabel, da die Betriebskosten, die des IST-

Zustands übersteigen. Lediglich die Wärmepumpen Stiebel Eltron WPL 23 E und Brötje BLW Split 16 wären bei Variante 1 und 2 unter leichten Einsparung gegenüber des IST-Zustands wirtschaftlich effektiv. Die folgende Abbildung 23 stellt die Betriebskosten beim Haushaltstromtarif dar. Die Werte sind entsprechend farblich markiert, wenn sie die Betriebskosten des IST-Zustands (blau) übersteigen (orange bis rot) oder niedriger (grün bis gelb) sind.

Tabelle 23 Vergleich der Betriebskosten über alle Anlagenvarianten bei Soll-Raumtemperatur (ST) 20°C und 25°C bei Haushaltstromtarif 0,4226 €/kWh (eigene Darstellung)

Raumtemperatur	Wärmepumpe	Variante 1	Variante 2	Variante 3	IST-Zustand
20	Stiebel Eltron	2.638,51	2.494,72	3.038,36	2.869,70
20	Brötje	2.690,72	2.539,98	3.105,11	2.869,70
20	Buderus	3.010,92	2.857,98	3.007,75	2.869,70
25	Stiebel Eltron	3.736,51	3.441,25	4.246,40	3.605,30
25	Brötje	3.950,45	3.529,95	4.321,34	3.605,30
25	Buderus	4.356,73	3.997,13	4.133,68	3.605,30

Die folgende Tabelle 24 stellt die Amortisationszeit der Anlagenvarianten anhand der in Tabelle 22 aufgeführten Betriebskosten dar. Diese Rechnung berücksichtigt noch keine Förderung der Wärmepumpe. Ein Beantragen von Förderungen führt zu einer Senkung der Investitionskosten. Die Rechnung erfolgte auf Basis gleichbleibender Strompreiskosten und Einspeisevergütungen. Die Amortisation wurde anhand folgender Gleichung errechnet (vgl. Fonseca, 2023)

$$\text{Amortisationszeit} = \frac{\text{Investitionskosten} - \text{Förderkosten}}{\text{Jährliche Einsparung} - \text{Jährliche Betriebskosten/Wartungskosten PV/WP}} \quad (8)$$

Tabelle 24 Amortisationszeit der Anlagenvarianten ohne Förderung. Hohe Amortisationszeit in Rot, niedrige in Grün bei Wärmepumpentarif 0,22 €/kWh (eigene Darstellung)

Raumtemperatur	Wärmepumpe	Variante 1	Variante 2	Variante 3
20	Stiebel Eltron	13,37	11,86	13,55
20	Brötje	13,62	12,03	13,79
20	Buderus	15,36	12,82	13,63
25	Stiebel Eltron	12,05	11,00	12,98
25	Brötje	12,91	11,24	13,26
25	Buderus	14,96	12,31	12,91

Angenommen wurden für die Anschaffung mit Einbau einer Wärmepumpe 20.000 € (16.000 € + 4.000 € Montagekosten) und für den Pufferspeicher 684 € (Conrad, 2024; SHWT, 2024). Für die Anschaffungskosten einer PV-Anlage mit Stromspeicher von 13.600 € wurde sich nach einem vorliegenden Angebot eines Solarunternehmens gerichtet. Zu finden ist das Angebot im digitalen Anhang. Mit einberechnet in die Amortisationszeit wurden Wartungskosten der Wärmepumpe mit 200€/a und eine Rücklage für etwaige Reparaturen der PV-Anlage von 100€/a (vgl. Glaesmann, 2022: S. 47, 235).

Die Variante 2 mit der bei Norm-Außentemperatur ausgelegten Wärmepumpe Stiebel Eltron WPL 23 bildet mit 11,00 Jahren die kürzeste Amortisationszeit. Die Amortisationszeit verringert sich

bei Erhöhen der Soll-Raumtemperatur auf 25°C, da die Wärmepumpe mehr Strom benötigt und dementsprechend mehr PV-Strom direkt verbraucht.

In Betrachtung der Amortisationszeiten in Tabelle 24 und der eher geringen zusätzlichen Investitionskosten eines Pufferspeichers wird Anlagenvariante 3 mit einer bei Norm-Außentemperatur in monovalenter Betriebsweise bei möglichst niedriger Soll-Raumtemperatur (hier: Stiebel Eltron WPL 23 E) empfohlen, da der Pufferspeicher die Einschaltungen der Wärmepumpe deutlich verringert und somit eine längere Lebenszeit gewährleistet werden kann. Zum Vergleich: Bei einer Vorlauftemperatur von 50°C und einer Soll-Raumtemperatur von 20°C muss die Wärmepumpe Stiebel Eltron WPL 23 E im Jahr ca. 2600 Mal Einschalten, während dieselbe Anlage mit einem 500 L Pufferspeicher nur noch 1700 Einschaltungen im Jahr aufweist (Vela Solaris, 2023).

## 5 Fazit

Im Folgenden werden die gestellten Leitfragen betrachtet und beantwortet.

1. Welche Häuser kommen für die Installation einer Wärmepumpe in Frage?

Die System-Jahresarbeitszahlen der einzelnen Anlagenvarianten liegen im typischen Bereich für Luft/Wasser-Wärmepumpen, die sich im Rahmen des Feldtests „WPsmart“ des Fraunhofer Instituts ergeben haben. In dem Feldtest wurden 32 Luft/Wasser-Wärmepumpen in der Praxis auf ihre Effizienz geprüft. Es ergab sich dabei ein typischer Bereich für Jahresarbeitszahlen der Luft/Wasser-Wärmepumpe von 2,5 bis 3,8 bei einem Mittelwert von 3,1 (vgl. Günther et al., 2020: S. 6). Die in dieser Bachelorarbeit simulierten Luft/Wasser-Wärmepumpen und deren Anlagenvarianten liegen allesamt in diesem genannten Jahresarbeitszahlbereich. Zudem konnte das Fraunhofer Institut im Rahmen ihres Feldtests keine Korrelation zwischen Baualter bzw. Baualtersklasse und der JAZ der Wärmepumpe herstellen. Es sollte folglich jedes Bestandsgebäude individuell betrachtet werden, da vor allem die individuellen Voraussetzungen des Gebäudes wie bspw. Qualität der Gebäudehülle sowie Art und Auslegung des Wärmeübergabesystems über die Effizienz von Wärmepumpen entscheiden (vgl. Günther et al., 2020: S. 7).

2. Ist es aus technischer und wirtschaftlicher Sichtweise sinnvoll eine Wärmepumpe mit einer Photovoltaikanlage zu betreiben?

Die Verbindung einer Wärmepumpe mit einer Photovoltaikanlage ist aus technischer und wirtschaftlicher Sicht sinnvoll. Mithilfe einer Photovoltaikanlage lässt sich die SJAZ um 5-6% steigern, was gleichzeitig zu einer Senkung der Betriebskosten um 5-6% im Vergleich zu einer Wärmepumpe ohne Photovoltaikanlage führt. Die Photovoltaikanlage steigert zudem den Eigenverbrauch aller anderen elektrischen Verbraucher (thermische Verbraucher ausgenommen) im Haus, sodass sich hier neben den Betriebskosteneinsparungen an der Wärmepumpe auch die Stromkosten insgesamt verringern, da weniger Strom aus dem Netz bezogen werden muss. Dies spiegelt sich durch hohe Autarkiewerte von bis 92% im Sommer wider. In kalten Jahreszeiten ist es zumindest tagsüber noch möglich gute Autarkiewerte zu erreichen. Über die Vergütung von ins Stromnetz eingespeisten überschüssigen Stroms sind zudem weitere Einnahmen zu verbuchen. Die Amortisationszeit einer Wärmepumpe mit Photovoltaik ist durch die genannten Aspekte wesentlich niedriger als bei einer Wärmepumpe ohne Photovoltaik.

Die Wirtschaftlichkeit einer Wärmepumpe gegenüber einer konventionellen Gasheizung hängt jedoch stark von den Strom- und Gaspreisen ab:

Damit eine Wärmepumpe bei den heutigen Energiepreisen gegenüber fossilen Brennstoffen wie z.B. Erdgas wirtschaftlich effizient ist muss die System-Jahresarbeitszahl bei einem Gaspreis von  $12,26 \frac{ct}{kWh}$  und einem Haushaltsstrompreis von  $42,26 \frac{ct}{kWh}$  mindestens  $SJAZ = \frac{42,26}{12,26} = 3,45$  betragen. Bei einem niedrigeren Strompreis (z.B. Wärmepumpentarif) von  $22,00 \frac{ct}{kWh}$  muss mindestens ein  $SJAZ = 1,79$  erreicht werden, damit die Wärmepumpe wirtschaftlicher als eine Gasheizung ist. Es ist davon auszugehen, dass der Gaspreis in Zukunft weiter steigen wird, da fossile Energieträger knapper verfügbar werden und der aufgeschlagene CO<sub>2</sub>-Preis weiter steigen wird.

Wird für ein Bestandsgebäude eine Wärmepumpe in Betracht gezogen, so sollte darauf geachtet werden die Vorlauftemperatur möglichst niedrig anzusetzen und die Raumtemperatur möglichst niedrig einzustellen. Vor der Planung einer Wärmepumpe sollte der energetische Stand durch z.B. eine Heizlastberechnung nach DIN 12831 aufgenommen werden und gegebenenfalls kleine Sanierungsmaßnahmen wie z.B. Tausch von Fenstern, Türen und Heizkörpern (Vergrößerung der Heizfläche) durchgeführt werden. Bei der Wahl der Wärmepumpe sollte auf einen hohen COP-Wert geachtet werden und sie sollte möglichst nah an der Norm-Außentemperatur des jeweiligen Standorts ausgelegt werden, sodass der Heizstab nicht groß unterstützen muss. Die Auslegung einer Wärmepumpe ist nicht abhängig von einer PV-Anlage. Es sind zwei voneinander unabhängige Systeme (eins thermisch und das andere elektrisch) und können dementsprechend unabhängig voneinander geplant werden.

Mithilfe der Simulation in PolySun konnten die Leitfragen in dieser Bachelorarbeit hinreichend beantwortet werden. Die in PolySun vorhandenen Standardvorlagen konnten entsprechend durch eigene Einstellungen angepasst werden. Die Ausgabe der Simulationsergebnisse ermöglichte eine hinreichende Auswertung der Ergebnisse anhand grafischer und tabellarischer Ausgabemöglichkeiten. PolySun verfügt über einen breiten Katalog an Wärmepumpen, aus denen man wählen kann. Leider wird in dem Katalog das Baujahr der Wärmepumpe nicht angezeigt, so kann es passieren, dass eine nicht mehr auf dem Markt verfügbare Wärmepumpe ausgewählt wird. Bauteile wie z.B. eine Photovoltaikanlage konnten einfach per Drag & Drop hinzugefügt werden und mithilfe des Wizards in PolySun ausgelegt werden.

## 6 Zusammenfassung

Simuliert wurde mit dem Simulationstool „PolySun“ von Vela Solaris ein Bestandsgebäude am Standort 25421 Pinneberg mit einer Norm-Außentemperatur von -9,5°C. Der IST-Zustand wies einen über 3 Jahre durchschnittlichen Brennstoffverbrauch von 23.407 kWh Erdgas auf bei Betriebskosten von 2869,70€. Simuliert wurden insgesamt drei Anlagenvarianten. In Anlagenvariante 1 wurde die bestehende Gasheizung durch eine Luft/Wasser-Wärmepumpe ersetzt. Simuliert wurden dabei drei unterschiedlich ausgelegte Wärmepumpen. Eine Wärmepumpe (Stiebel Eltron WPL 23 E) ist optimal ausgelegt nach Norm-Außentemperatur in monovalenter Betriebsweise. Die nächsten beiden Wärmepumpen (Brötje BLW Split 16 und Buderus WPL 110 I) haben schrittweise weniger Heizleistung bei Norm-Außentemperatur und werden in monoenergetischer Betriebsweise betrieben und durch einen internen elektrischen Heizstab unterstützt. In Anlagenvariante 2 wurde die Wärmepumpe um eine Photovoltaikanlage

mit Stromspeicher erweitert. In Anlagenvariante 3 wurde zusätzlich zur Wärmepumpe und Photovoltaik mit Stromspeicher ein Pufferspeicher installiert. Grundsätzlich hat sich gezeigt, dass der Energiebedarf des Gebäudes mit jeder Anlagenvariante gedeckt werden konnte. Simuliert wurde jeweils bei Vorlauftemperaturen 50, 55 und 60°C und einer Soll-Raumtemperatur von 20°C und 25°C. Herausgestellt haben sich die Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 20°C als optimale Betriebsbedingungen.

Für Anlagenvariante 1 ergaben sich System-Jahresarbeitszahlen von 2,8 bis 3,47. Die höchste System-Jahresarbeitszahl ergab mit der optimal ausgelegten Wärmepumpe Stiebel Eltron WPL 23 E bei Vorlauftemperatur 50°C und Raumtemperatur 20°C. Ein Anheben der Temperaturen oder das Einbauen einer Wärmepumpe mit geringerer Heizleistung (Brötje BLW Split 16 und Buderus WPL 110 I) führte zu einer Verschlechterung der Anlageneffizienz. Grund für die Verschlechterung der Anlageneffizienz in monoenergetischer Betriebsweise liegt im übermäßigen Einsatz des internen elektrischen Heizstabes, der die fehlende Heizleistung abdecken muss. Bei Verwendung eines Wärmepumpentarifs von 0,22 €/kWh würden sich die Betriebskosten der optimal ausgelegten Wärmepumpe Stiebel Eltron WPL 23 E auf 1.373,52 € pro Jahr belaufen und wären somit um 52% geringer gegenüber dem IST-Zustand. Die Amortisationszeit dieser Anlagenvariante beläuft sich auf 13,37 Jahre ohne Förderungen bei optimalen Betriebsbedingungen.

Die zusätzlich installierte Photovoltaikanlage in Anlagenvariante 2 führte bei allen Wärmepumpen zu einer Steigerung der System-Jahresarbeitszahl um bis zu 6%. Bei der Auswahl des Stromspeichers sollte darauf geachtet werden, dass dieser nicht zu groß, aber auch nicht zu klein dimensioniert ist. Die Dimensionierung des Stromspeichers orientiert sich an der Leistung der PV-Anlage und dem Gesamtstromverbrauch (Wärmepumpenstromverbrauch und Stromverbrauch elektrischer Verbraucher) im Gebäude. Ist ein zu großer Stromspeicher verbaut, hat sich gezeigt, dass der Stromspeicher an einem sonnigen Tag nicht vollgeladen werden kann oder zu viel Kapazität ungenutzt gespeichert wird. Als optimale Größe hat sich in diesem Fall ein Stromspeicher mit 7,5 kWh Kapazität erwiesen. Mit Photovoltaik und Stromspeicher ergaben sich System-Jahresarbeitszahlen von 3,06 bis 3,67. Dadurch, dass sich mithilfe der Photovoltaikanlage die System-Jahresarbeitszahl um 6% verbessert hat, verringerten sich auch die Betriebskosten um 6% bei einem Wärmepumpentarif von 0,22 €/kWh für die optimal ausgelegte Wärmepumpe Stiebel Eltron WPL 23 E auf 1.298,72 € pro Jahr. Die Amortisationszeit dieser Anlagenvariante beläuft sich auf 11,86 Jahre ohne Förderungen bei optimalen Betriebsbedingungen.

Die Einbindung eines Pufferspeichers in Anlagenvariante 3 führte zu Effizienzeinbußen, da die Wärmepumpe zusätzlichen Strom benötigt, um das hinzugekommene Heizwasservolumen aufzuheizen. Die Ergebnisse zeigten, dass die Vergrößerung des Pufferspeichervolumens ab einer bestimmten Größe keinen Einfluss auf die System-Jahresarbeitszahl hat. Als optimale Größe hat sich ein Pufferspeicher mit 500 Litern Volumen herausgestellt. Zudem ließen sich die Taktungen der Wärmepumpe durch den Einsatz des Pufferspeichers verringern, was zu einer Verbesserung der Lebensdauer der Wärmepumpe führt. Es ergaben sich System-Jahresarbeitszahlen von 2,60 bis 3,01. Die besten System-Jahresarbeitszahlen traten bei 50°C Vorlauftemperatur und 20°C Raumtemperatur auf. Im Gegensatz zu den anderen Anlagenvarianten hat hier die Wärmepumpe mit der geringsten Heizleistung die höchste System-Jahresarbeitszahl. Grund dafür war, dass der Pufferspeicher dafür gesorgt hat, dass die Wärmepumpe bei geringen Außentemperaturen nicht einschalten musste. Die Betriebskosten dieser Anlagenvariante belaufen sich mit der

Wärmepumpe Stiebel Eltron WPL 23 E auf 1.581,73 € pro Jahr. Die Amortisationszeit dieser Anlagenvariante beträgt 13,55 Jahre bei optimalen Betriebsbedingungen.

Unter dem Hintergrund der geringeren Taktrate der Wärmepumpe durch den Pufferspeicher in Anlagenvariante 3 und dass ein Pufferspeicher zur Überbrückung von Sperrzeiten seitens des Netzbetreibers bei Verwendung eines Wärmepumpentarifs oder für das Abtauprogramm im Winter gegen Vereisung des Außengeräts nötig ist, sollte sich für Anlagenvariante 3 entschieden werden. Die Amortisationszeit ist nur ein wenig höher als Anlagenvariante 1 oder 2 birgt aber den Vorteil der längeren Lebenszeit der Wärmepumpe, da sie weniger Takten muss. Die System-Jahresarbeitszahlen der Anlagenvarianten liegen allesamt im typischen Bereich für Luft-/Wasser Wärmepumpen von 2,5 bis 3,8 aus dem vom Fraunhofer Institut durchgeführten Feldtest „WPsmart“. Ob eine Wärmepumpe für ein Bestandsgebäude in Frage kommt, sollte aufgrund der unterschiedlichen Gegebenheiten bei Bestandsgebäuden individuell betrachtet werden, da im Rahmen des Feldtests des Fraunhofer Instituts keine Korrelation zum Baujahr des Gebäudes und der Systemjahresarbeitszahl hergestellt werden konnte.

Eine Wärmepumpe kann im Bestand im Vergleich zu einer Gasheizung wirtschaftlich rentabel betrieben werden. Abhängig sind die Betriebskosten vom aktuellen Strompreis. Damit das Wärmepumpensystem im Betrieb günstiger ist als eine vergleichbare Gasheizung muss die System-Jahresarbeitszahl bei den aktuellen Strom- und Gaspreisen (42,26 ct/kWh Strom und 12,26 ct/kWh Erdgas) 3,45 betragen. Es sollte folglich darauf geachtet werden einen möglichst günstigen Stromtarif zu wählen. Zudem kann davon ausgegangen werden, dass der Gaspreis aufgrund des CO<sub>2</sub>-Preises weiter steigen wird.

In einer weiterführenden Arbeit könnte die Performance der in dieser Arbeit aufgeführten Anlagenvarianten in der Praxis ähnlich wie im Feldtest „WPsmart“ des Fraunhofer Instituts durchgeführt, über einen gesetzten Zeitraum beobachtet und anschließend mit den Ergebnissen dieser Arbeit verglichen werden.

## Literaturverzeichnis

- Baunetz Wissen (o.J.) *Pufferspeicher* [Online]. Verfügbar unter <https://www.baunetzwissen.de/heizung/fachwissen/speicher/pufferspeicher-161202> (Abgerufen am 22 Januar 2024).
- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2023) *Liste der förderfähigen Wärmepumpen mit Prüf-/Effizienznachweis: Bundesförderung für effiziente Gebäude - Einzelmaßnahmen (BEG EM) Zuschuss* [Online]. Verfügbar unter [https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/beg\\_waermepumpen\\_anlagenliste.html](https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/beg_waermepumpen_anlagenliste.html) (Abgerufen am 23 Januar 2024).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2024) *Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG)* [Online]. Verfügbar unter <https://www.energiewechsel.de/KAENEF/Redaktion/DE/Dossier/beg.html> (Abgerufen am 23 Januar 2024).

- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2023) *Bundeskabinett beschließt Novelle des Gebäudeenergiegesetzes - Umstieg auf Heizen mit Erneuerbaren eingeleitet* [Online]. Verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/04/20230419-bundeskabinett-beschliesst-novelle-des-gebaeudeenergiegesetzes.html#:~:text=Kurzüberblick%20über%20die%20GEG%20Novelle,Auch%20Reparaturen%20sind%20weiter%20möglich.> (Abgerufen am 23 Januar 2024).
- Bundesregierung (2022) *Generationenvertrag für das Klima* [Online]. Verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672> (Abgerufen am 6 Januar 2024).
- Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. (o.J.) *Klimakarte* [Online]. Verfügbar unter <https://www.waermepumpe.de/normen-technik/klimakarte/> (Abgerufen am 15 Januar 2024).
- Conrad (2024) *Stiebel Eltron WPL 24 I* [Online]. Verfügbar unter <https://www.conrad.de/de/p/stiebel-eltron-wpl-24-i-235194-luft-wasser-waermepumpe-energieeffizienzklasse-a-a-g-1930455.html#productTechData> (Abgerufen am 26 Februar 2024).
- Deutsche Energie-Agentur (o.J.) *Gebäude energieeffizient gestalten: Zahlen & Fakten* [Online]. Verfügbar unter <https://www.dena.de/themen-projekte/energieeffizienz/gebaeude/> (Abgerufen am 28 Januar 2024).
- Deutsche Energie-Agentur (dena) (2023) *dena-Gebäudereport 2024: Klimaschutz im Gebäudebestand - rasches Handeln ist dringend erforderlich* [Online]. Verfügbar unter <https://www.dena.de/newsroom/meldungen/2023/dena-gebaeudereport-2024-klimaschutz-im-gebaeudebestand/> (Abgerufen am 6 Januar 2024).
- Fonseca, S. (2023) *Amortisation und Wirtschaftlichkeit einer Wärmepumpe* [Online]. Verfügbar unter <https://gruenes.haus/amortisation-waermepumpe/> (Abgerufen am 26 Februar 2024).
- Glaesmann, N. (2022) *Wärmepumpenheizungen: Planungshilfe und Ratgeber für Neubauten und Bestandsgebäude* [Online], Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden. Verfügbar unter <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-39031-0> (Abgerufen am 2 Januar 2024).
- Goeke, J. (2021) *Thermische Energiespeicher in der Gebäudetechnik: Sensible Speicher, Latente Speicher, Systemintegration* [Online], Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden. Verfügbar unter <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-34510-5> (Abgerufen am 2 Januar 2024).
- Günther, D., Wapler, J., Langner, R., Helmling, S., Miara, M., Fischer, D., Zimmermann, D., Wolf, T. & Wille-Hausmann, B. (2020) *WPsmart IM BESTAND: Felduntersuchung optimal abgestimmter Wärmepumpenheizungssysteme in Bestandsgebäuden beim Betrieb im konventionellen sowie im intelligenten Stromnetz (Smart Grid)* [Online], Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/wp-smart-im-bestand.html> (Abgerufen am 2 März 2024).
- Hegger, M. (2012) *Baustoff Atlas* [Online], Basel, München, De Gruyter, Inst. für Internationale Architektur-Dokumentation. Verfügbar unter <https://www.degruyter.com/document/doi/10.11129/detail.9783034614481/html#contents> (Abgerufen am 27 Januar 2024).
- International Energy Agency (Hg.) (2022) *The Future of Heat Pumps* [Online], OECD. Verfügbar unter [https://www.oecd-ilibrary.org/energy/the-future-of-heat-pumps\\_2bd71107-en](https://www.oecd-ilibrary.org/energy/the-future-of-heat-pumps_2bd71107-en) (Abgerufen am 2 Januar 2024).



- Kaltschmitt, M. (2020) *Erneuerbare Energien: Systemtechnik, wirtschaftlichkeit, umweltaspekte* [Online], Springer Vieweg. Verfügbar unter <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-61190-6> (Abgerufen am 14 Januar 2024).
- KfW (o.J.) *Die Effizienzhaus-Stufen für bestehende Immobilien und Baudenkmale* [Online]. Verfügbar unter <https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestehende-Immobilie/Energieeffizient-sanieren/Das-Effizienzhaus/?redirect=647746> (Abgerufen am 23 Januar 2024).
- Konrad, F. (2008) *Planung von Photovoltaik-Anlagen: Grundlagen und Projektierung ; mit 16 Tabellen* [Online], 2. Aufl., Wiesbaden, Vieweg + Teubner. Verfügbar unter <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-8348-9542-4> (Abgerufen am 6 Januar 2024).
- Laasch, T. & Laasch, E. (2013) *Haustechnik: Grundlagen - Planung - Ausführung* [Online], Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden. Verfügbar unter <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-8348-9900-2> (Abgerufen am 2 Januar 2024).
- Mertens, K. (2020) *Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis* [Online], 5. Aufl., München, Hanser, Carl. Verfügbar unter <https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446465060> (Abgerufen am 6 Januar 2024).
- Orth, N., Weniger, J. & Meissner, L. (2022) *Empfehlungen zur Auslegung von Solarstromspeichern: Welche Faustformeln helfen bei der Wahl der passenden Batteriekapazität in Einfamilienhäusern mit Photovoltaikanlagen?* [Online], HTW Berlin. Verfügbar unter <https://solar.htw-berlin.de/publikationen/auslegung-von-solarstromspeichern/> (Abgerufen am 17 Februar 2024).
- Quaschnig, V. (2015) *Regenerative Energiesysteme: Technologie - Berechnung - Simulation; mit ... 119 Tab.*, 9. Aufl., München, Hanser.
- SHWT (2024) *500 Liter Pufferspeicher mit 1 Wärmetauscher inkl. Isolierung* [Online]. Verfügbar unter <https://shwt-warmwasserspeicher.de/500-Liter-Pufferspeicher-mit-1-Waermetauscher-inkl-Isolierung> (Abgerufen am <https://shwt-warmwasserspeicher.de/500-Liter-Pufferspeicher-mit-1-Waermetauscher-inkl-Isolierung>).
- Sobotta, S. (2022) *Praxis Wärmepumpe: Technik, Planung, Installation*, 4. Aufl., Berlin, Beuth Verlag.
- Stadtwerke Ratingen (2021) *Messkonzepte* [Online]. Verfügbar unter [https://netze.stadtwerke-ratingen.de/fileadmin/SW-Ratingen/user\\_upload/Downloads/Messkonzepte/Datenblatt\\_Messkonzepte.pdf](https://netze.stadtwerke-ratingen.de/fileadmin/SW-Ratingen/user_upload/Downloads/Messkonzepte/Datenblatt_Messkonzepte.pdf) (Abgerufen am 17 Februar 2024).
- Statista (2023) *Vergleich der aus Russland importierten Gasmenge mit den gesamten deutschen Gasimporten von 2011 bis 2021* [Online]. Verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1302674/umfrage/russischer-anteil-am-deutschen-gasimport/#:~:text=Im%20Jahr%202021%20importiere%20Deutschland%20insgesamt%20rund%2085%20Milliarden%20Kubikmeter%20Erdgas.> (Abgerufen am 6 Januar 2024).
- Statistisches Bundesamt (2023) *Stromdurchschnittspreis* [Online]. Verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Erdgas-Strom-Durchschnittspreise/\\_inhalt.html](https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Erdgas-Strom-Durchschnittspreise/_inhalt.html) (Abgerufen am 6 Januar 2024).
- Stiebel Eltron (o.J.) *Bedienung und Installation: Luft/Wasser Wärmepumpe WPL 23 E* [Online]. Verfügbar unter [https://www.stiebel-eltron.de/content/dam/ste/cdbassets/historic/bedienungs-\\_u\\_installationsanleitungen/WPL\\_13-23\\_E\\_cool\\_65860d00-34ad-11e7-8b2e-005056a95add.pdf](https://www.stiebel-eltron.de/content/dam/ste/cdbassets/historic/bedienungs-_u_installationsanleitungen/WPL_13-23_E_cool_65860d00-34ad-11e7-8b2e-005056a95add.pdf) (Abgerufen am 6 Februar 2024).

- Umweltbundesamt (2023) *Indikator: Energieverbrauch für Gebäude* [Online], Umweltbundesamt. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-energieverbrauch-fuer-gebaeude#welche-bedeutung-hat-der-indikator> (Abgerufen am 6 Januar 2024).
- Vela Solaris (2023) *PolySun (2023.11)* [Computerprogramm].
- Wang, Z., Luther, M. B., Amirkhani, M., Liu, C. & Horan, P. (2021) "State of the Art on Heat Pumps for Residential Buildings", *Buildings*, Vol. 11, No. 8, S. 350 [Online]. DOI: 10.3390/buildings11080350 (Abgerufen am 2 Januar 2024).
- Wesselak, V. & Voswinckel, S. (2012) *Photovoltaik: Wie Sonne zu Strom wird* [Online], Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg. Verfügbar unter <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-24297-7> (Abgerufen am 6 Januar 2024).
- Westnetz GmbH (2021) *Messkonzepte* [Online]. Verfügbar unter <https://www.westnetz.de/content/dam/revu-global/westnetz/documents/onlineportale/aktuelles/messkonzepte-westnetz-2021-01-01.pdf> (Abgerufen am 17 Februar 2024).
- Wietschel (2015) *Energietechnologien der Zukunft: Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze* [Online], Springer Fachmedien Wiesbaden. Verfügbar unter <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-07129-5> (Abgerufen am 7 Januar 2024).

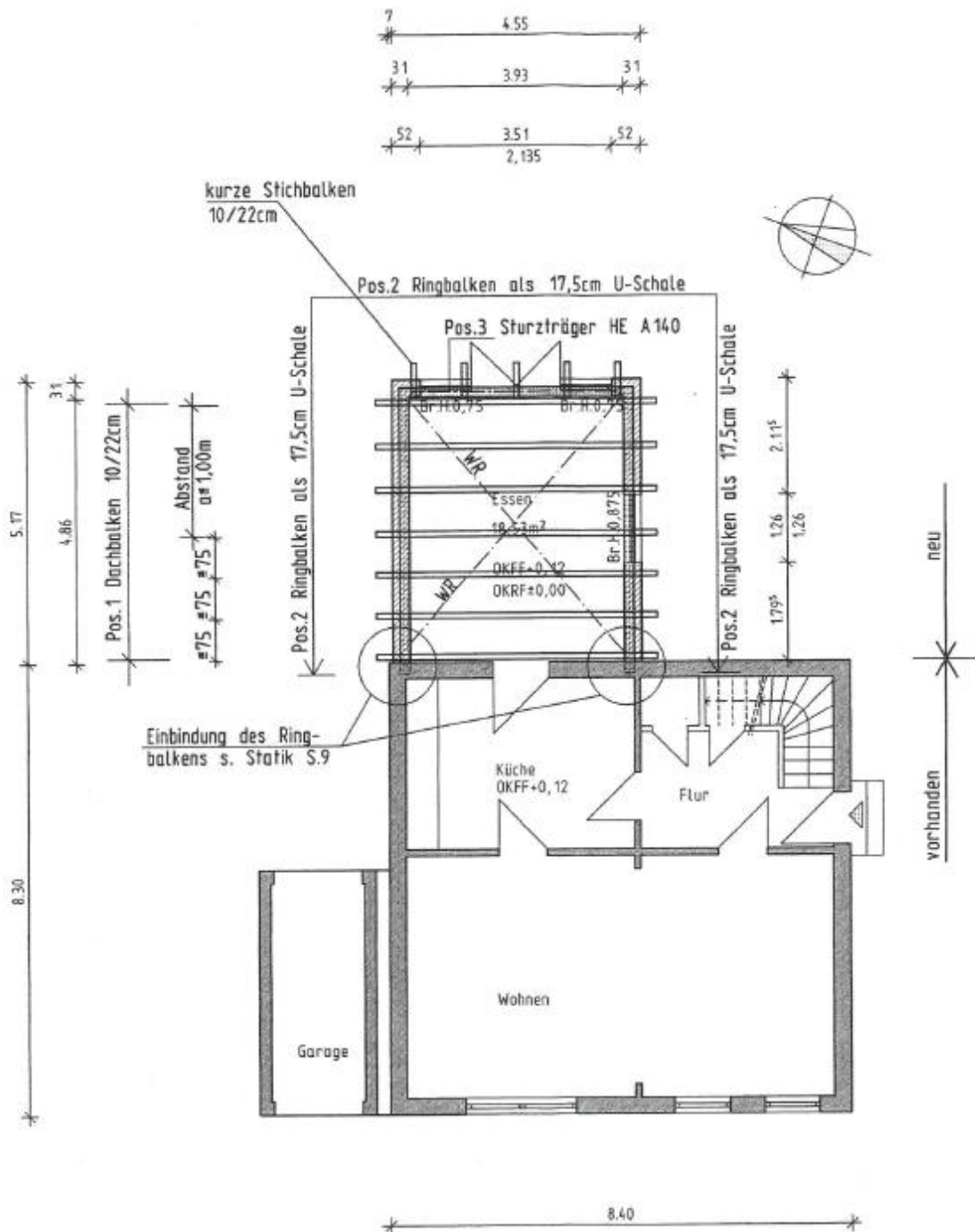
## Anhang

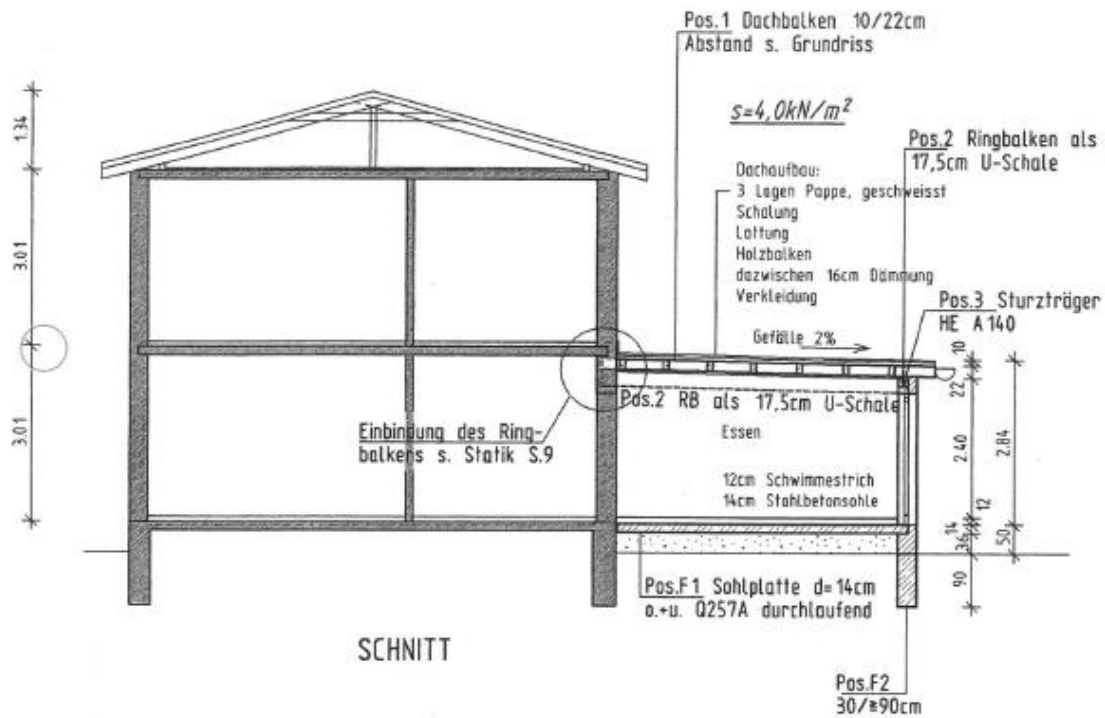
Anhang 1 – Grundrisse Gebäude	S. 52
Anhang 2 – Auslegung Photovoltaik	S. 54
Anhang 3 – Bivalenzpunktbestimmung Stiebel Eltron WPL 23 E	S. 55
Anhang 4 – Simulationsergebnisse Anlagenvariante 2 Brötje und Buderus	S. 56
Anhang 5 – Simulationsergebnisse Anlagenvariante 3 Brötje und Heliotherm	S. 57

## Digitaler Anhang

- PolySun Projektdatei „Projekt\_BA“
- Exceldatei „Ergebnistabellen“
- Powerpointdatei „Auslegung PV-Anlage“
- Angebot Photovoltaikanlage mit Stromspeicher
- Dokumentation/Reports der Simulationen aus PolySun
- Energiekostenabrechnungen der Jahre 2020-2022

# Anhang 1 - Grundrisse Gebäude





SCHNITT


Wandaufbau:  
1,5 cm Putz  
12 cm WDVS Wärmedämmverbundsystem  
17,5 cm HLZ (Poroton o.ä.)

 NEU  
 VORHANDEN

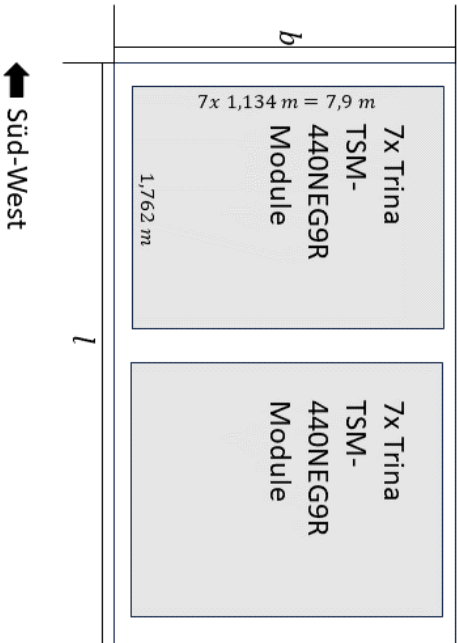
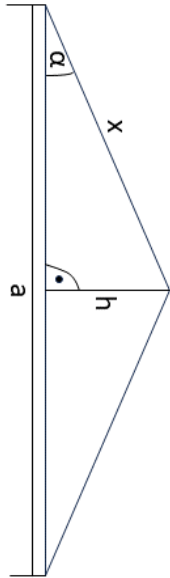
Materialien:  
Beton B25  
Betonstahl BSt. 500M+500S  
Stahl St.37-2  
Holz NH II  
Mauerwerk: aussen  
7,5cm HLZ-Hintermauerwerk (Poroton o.ä.)  
2cm WDVS (Wärmedämmverbundsystem)  
1,5 cm Putz

Die Gründung ist frostfrei (≠90cm)  
auf gewachsenen tragfähigen  
Böden abzusetzen!

Änderung			

[REDACTED]		
Bauvorhaben:	Anbau an ein Wohnhaus in Pinneberg	Bl.-Nr. 23042 03
Bauteil:	Grundriss Erdgeschoss Schnitt	Maßstab: 1:100
		Gez.: Kö. Datum: 10.07.2003
Darstellung:	Positionsplan	Ges.: Datum: Blattgröße: A3

## Anhang 2 – Auslegung Photovoltaik



Annahme: Dachüberstand ist auf dem Grundriss nicht angegeben.  
Angenommen mit  $y = 30$  cm. Muss der Länge und Breite des Daches hinzugegerechnet werden

### Neigung

Gegeben:  $h = 1,34$  m;  $a = 8,3$  m +  $2 \cdot 0,3$  m =  $8,9$  m

Ges.:  $x, \alpha$

$$x = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + h^2} = \sqrt{\left(\frac{8,9}{2}\right)^2 + 1,34^2} = 4,65 \text{ m}$$

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{h}{x}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{1,34}{4,65}\right) = 16,7^\circ$$

### Dachfläche: Maximal mögliche Anzahl Module

Gegeben:  $b = 8,4$  m +  $2 \cdot 0,3$  m =  $9,0$  m;  $l = \frac{a}{2} = \frac{8,9}{2} = 4,45$  m

$A_{\text{Dachfläche}} = l \cdot b = 9 \text{ m} \cdot 4,45 \text{ m} = 40,05 \text{ m}^2$

$A_{\text{Modulfläche}} = 1,762 \text{ m} \cdot 1,134 \text{ m} = 1,998 \text{ m}^2$

$$n_{\text{maxAnzahl Module}} = \frac{A_{\text{Dachfläche}}}{A_{\text{Modulfläche}}} = \frac{40,05 \text{ m}^2}{1,998 \text{ m}^2} = 20,05 \text{ Module}$$

Aufgrund der Modulbreite von  $1,134$  m passen unter Berücksichtigung von Sicherheitsabständen nur maximal 7 Module nebeneinander ( $b_{\text{Moduleges}} = 7 \cdot 1,134 \text{ m} = 7,9 \text{ m}$ ). Die Modullänge von  $1,762$  m erlaubt einen zweiten String mit je 7 Modulen auf dem Dach zu installieren ( $l_{\text{Moduleges}} = 2 \cdot 1,762 \text{ m} = 3,524 \text{ m}$ ). Auf dem Dach können demzufolge maximal 14 Module installiert werden.

### Anhang 3 - Bivalenzpunktbestimmung Stiebel Eltron WPL 23 E

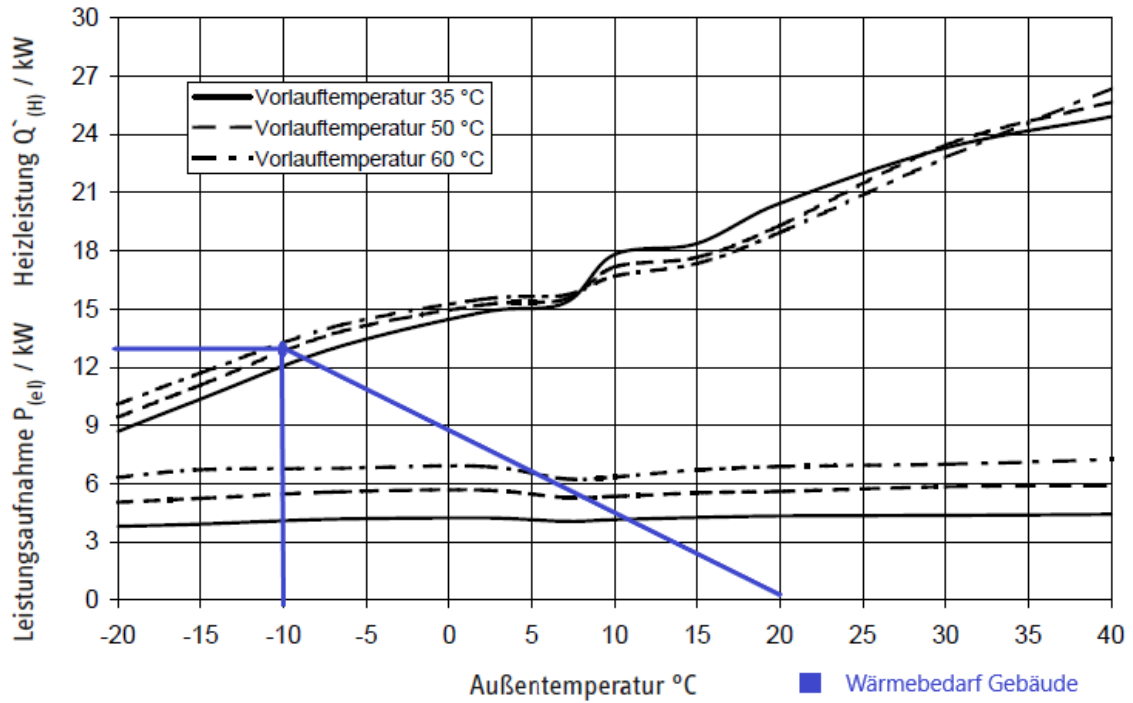


Abbildung 46 Bivalenzpunktbestimmung (Stiebel Eltron, o.J.)

### Anhang 3 – Simulationsergebnisse Variante 2 Brötje und Buderus

Tabelle 25 Ergebnistabelle Brötje BLZ Split 16 bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 20°C (eigene Darstellung)

Speichergröße [kWh]	Autarkiegrad [%]	Batterieentladeenergie [kWh]	SJAZ [-]	Eigenverbrauch [kWh]	Netzeinspeisung [kWh]	Eigenverbrauchsverhältnis [%]
0,00	18,10	0,00	3,59	1912,00	3502,00	35,30
2,50	25,70	835,00	3,57	2840,00	2573,00	52,50
5,00	30,50	1325,00	3,57	3394,00	2019,00	62,70
7,50	33,10	1598,00	3,57	3700,00	1714,00	68,30
10,00	34,20	1710,00	3,57	3826,00	1588,00	70,70

Tabelle 26 Ergebnistabelle Buderus WPL 110 I bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 20°C (eigene Darstellung)

Speichergröße [kWh]	Autarkiegrad [%]	Batterieentladeenergie [kWh]	SJAZ [-]	Eigenverbrauch [kWh]	Netzeinspeisung [kWh]	Eigenverbrauchsverhältnis [%]
0,00	17,00	0,00	3,16	1922,00	3491,00	35,50
2,50	24,00	838,00	3,15	2845,00	2568,00	52,60
5,00	28,50	1326,00	3,15	3396,00	2018,00	62,70
7,50	30,90	1602,00	3,15	3705,00	1708,00	68,40
10,00	32,00	1720,00	3,15	3837,00	1576,00	70,90

Tabelle 27 Ergebnistabelle Stiebel Eltron WPL 23 E bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 25°C (eigene Darstellung)

Speichergröße [kWh]	Autarkiegrad [%]	Batterieentladeenergie [kWh]	SJAZ [-]	Eigenverbrauch [kWh]	Netzeinspeisung [kWh]	Eigenverbrauchsverhältnis [%]
0,00	15,20	0,00	3,58	1982,00	3432,00	36,60
2,50	21,90	903,00	3,58	2978,00	2435,00	55,00
5,00	25,50	1360,00	3,58	3492,00	1922,00	64,50
7,50	27,90	1675,00	3,58	3844,00	1570,00	71,00
10,00	29,50	1885,00	3,58	4079,00	1335,00	75,30

Tabelle 28 Ergebnistabelle Brötje BLW Split 16 bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 25°C (eigene Darstellung)

Speichergröße [kWh]	Autarkiegrad [%]	Batterieentladeenergie [kWh]	SJAZ [-]	Eigenverbrauch [kWh]	Netzeinspeisung [kWh]	Eigenverbrauchsverhältnis [%]
0,00	14,80	0,00	3,40	2002,00	3411,00	37,00
2,50	21,30	916,00	3,39	3015,00	2398,00	55,70
5,00	24,60	1354,00	3,39	3510,00	1904,00	64,80
7,50	26,90	1660,00	3,39	3852,00	1562,00	71,20
10,00	28,50	1867,00	3,39	4084,00	1330,00	75,40

Tabelle 29 Ergebnistabelle Buderus WPL 110 I bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 25°C (eigene Darstellung)

Speichergröße [kWh]	Autarkiegrad [kWh]	Batterieentladeenergie [kWh]	SJAZ [-]	Eigenverbrauch [kWh]	Netzeinspeisung [kWh]	Eigenverbrauchsverhältnis [%]
0,00	13,90	0,00	3,06	2016,00	3398,00	37,20
2,50	19,80	887,00	3,06	3003,00	2411,00	55,50
5,00	22,90	1327,00	3,06	3498,00	1916,00	64,60
7,50	25,10	1644,00	3,06	3851,00	1562,00	71,10
10,00	26,70	1871,00	3,06	4104,00	1310,00	75,80

## Anhang 5 – Simulationsergebnisse Anlagenvariante 3 Brötje und Heliotherm

Tabelle 30 Ergebnistabelle Brötje BLW Split 16 bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 20°C (eigene Darstellung)

Pufferspeicher [L]	SJAZ	Stromverbrauch Wärmepumpe [kWh]	Nutzenergie [kWh]	Energiebedarf [kWh]	Erzeugte Wärmeenergie [kWh]
300	2,69	7654,00	20002,00	20070,00	21171,00
500	2,75	7595,00	20128,00	20206,00	21227,00
700	2,75	7596,00	20083,00	20163,00	21256,00
1000	2,74	7604,00	20021,00	20096,00	21301,00
1200	2,73	7615,00	19992,00	20069,00	21314,00



Tabella 31 Ergebnistabelle Brötje BLW Split 16 bei Vorlauftemperatur 55°C und Soll-Raumtemperatur 20°C (eigene Darstellung)

Puffer-speicher [L]	SJAZ	Stromverbrauch Wärmepumpe [kWh]	Nutzenergie [kWh]	Energiebedarf [kWh]	Erzeugte Wärme-energie [kWh]
300	2,69	7676,00	19988,00	20054,00	21197,00
500	2,69	7722,00	20050,00	20128,00	21279,00
700	2,68	7734,00	20007,00	20084,00	21293,00
1000	2,68	7751,00	19930,00	20006,00	21345,00
1200	2,65	7784,00	19885,00	19962,00	21391,00

Tabella 32 Ergebnistabelle Brötje BLW Split 16 bei Vorlauftemperatur 60°C und Soll-Raumtemperatur 20°C (eigene Darstellung)

Puffer-speicher [L]	SJAZ	Stromverbrauch Wärmepumpe [kWh]	Nutzenergie [kWh]	Energiebedarf [kWh]	Erzeugte Wärme-energie [kWh]
300	2,67	7689,00	19961,00	20030,00	21212,00
500	2,66	7760,00	19969,00	20046,00	21311,00
700	2,64	7797,00	19911,00	19991,00	21348,00
1000	2,64	7825,00	19824,00	19905,00	21412,00
1200	2,63	7842,00	19787,00	19867,00	21426,00

Tabella 33 Ergebnistabelle Brötje BLW Split 16 bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 25°C (eigene Darstellung)

Puffer-speicher [L]	SJAZ	Stromverbrauch Wärmepumpe [kWh]	Nutzenergie [kWh]	Energiebedarf [kWh]	Erzeugte Wärme-energie [kWh]
300	2,79	10732,00	28857,00	28921,00	29994,00
500	2,85	10616,00	29064,00	29143,00	30000,00
700	2,84	10619,00	29007,00	29088,00	29995,00
1000	2,84	10626,00	28919,00	28998,00	30002,00
1200	2,82	10651,00	28891,00	28962,00	30019,00

Tabella 34 Ergebnistabelle Brötje BLW Split 16 bei Vorlauftemperatur 55°C und Soll-Raumtemperatur 25°C (eigene Darstellung)

Puffer-speicher [L]	SJAZ	Stromverbrauch Wärmepumpe [kWh]	Nutzenergie [kWh]	Energiebedarf [kWh]	Erzeugte Wärme-energie [kWh]
300	2,78	10749,00	28832,00	28897,00	29997,00
500	2,79	10782,00	28947,00	29028,00	30002,00
700	2,78	10811,00	28891,00	28969,00	30026,00
1000	2,77	10816,00	28790,00	28869,00	30012,00
1200	2,76	10833,00	28740,00	28818,00	30022,00

Tabella 35 Ergebnistabelle Bröje BLW Split 16 bei Vorlauftemperatur 60°C und Soll-Raumtemperatur 25°C (eigene Darstellung)

<b>Puffer-speicher [L]</b>	<b>SJAZ</b>	<b>Stromverbrauch Wärmepumpe [kWh]</b>	<b>Nutzenergie [kWh]</b>	<b>Energiebedarf [kWh]</b>	<b>Erzeugte Wärme-energie [kWh]</b>
300	2,77	10755,00	28808,00	28871,00	29998,00
500	2,77	10820,00	28830,00	28916,00	30007,00
700	2,76	10849,00	28759,00	28841,00	30004,00
1000	2,75	10875,00	28646,00	28723,00	30023,00
1200	2,73	10886,00	28584,00	28666,00	30021,00

Tabella 36 Ergebnistabelle Heliotherm HP12L-K-BC bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 20°C (eigene Darstellung)

<b>Puffer-speicher [L]</b>	<b>SJAZ</b>	<b>Stromverbrauch Wärmepumpe [kWh]</b>	<b>Nutzenergie [kWh]</b>	<b>Energiebedarf [kWh]</b>	<b>Erzeugte Wärme-energie [kWh]</b>
300	2,30	8969,00	20001,00	20086,00	21146,00
500	2,84	7372,00	20116,00	20213,00	21210,00
700	2,85	7330,00	20066,00	20161,00	21241,00
1000	2,88	7279,00	19998,00	20094,00	21289,00
1200	2,86	7305,00	19967,00	20064,00	21315,00

Tabella 37 Ergebnistabelle Heliotherm HP12L-K-BC bei Vorlauftemperatur 55°C und Soll-Raumtemperatur 20°C (eigene Darstellung)

<b>Puffer-speicher [L]</b>	<b>SJAZ</b>	<b>Stromverbrauch Wärmepumpe [kWh]</b>	<b>Nutzenergie [kWh]</b>	<b>Energiebedarf [kWh]</b>	<b>Erzeugte Wärme-energie [kWh]</b>
300	2,28	9021,00	19983,00	20069,00	21174,00
500	2,57	8069,00	20033,00	20131,00	21253,00
700	2,59	8026,00	19985,00	20083,00	21288,00
1000	2,59	8004,00	19907,00	20006,00	21338,00
1200	2,60	7998,00	19863,00	19961,00	21348,00

Tabella 38 Ergebnistabelle Heliotherm HP12L-K-BC bei Vorlauftemperatur 60°C und Soll-Raumtemperatur 20°C (eigene Darstellung)

<b>Puffer-speicher [L]</b>	<b>SJAZ</b>	<b>Stromverbrauch Wärmepumpe [kWh]</b>	<b>Nutzenergie [kWh]</b>	<b>Energiebedarf [kWh]</b>	<b>Erzeugte Wärmeenergie [kWh]</b>
300	2,26	9080,00	19955,00	20043,00	21186,00
500	2,41	8566,00	19958,00	20055,00	21279,00
700	2,43	8517,00	19899,00	19995,00	21309,00
1000	2,43	8529,00	19808,00	19908,00	21376,00
1200	2,42	8546,00	19761,00	19857,00	21399,00

Tabella 39 Ergebnistabelle Heliotherm HP12L-K-BC bei Vorlauftemperatur 50°C und Soll-Raumtemperatur 25°C (eigene Darstellung)

<b>Puffer-speicher [L]</b>	<b>SJAZ</b>	<b>Stromverbrauch Wärmepumpe [kWh]</b>	<b>Nutzenergie [kWh]</b>	<b>Energiebedarf [kWh]</b>	<b>Erzeugte Wärmeenergie [kWh]</b>
300	2,39	12515,00	28863,00	28945,00	29974,00
500	2,98	10174,00	29045,00	29149,00	29984,00
700	3,01	10075,00	28989,00	29090,00	29984,00
1000	3,01	10063,00	28908,00	29001,00	29997,00
1200	3,01	10066,00	28869,00	28961,00	29976,00

Tabella 40 Ergebnistabelle Heliotherm HP12L-K-BC bei Vorlauftemperatur 55°C und Soll-Raumtemperatur 25°C (eigene Darstellung)

<b>Puffer-speicher [L]</b>	<b>SJAZ</b>	<b>Stromverbrauch Wärmepumpe [kWh]</b>	<b>Nutzenergie [kWh]</b>	<b>Energiebedarf [kWh]</b>	<b>Erzeugte Wärmeenergie [kWh]</b>
300	2,37	12580,00	28842,00	28927,00	29975,00
500	2,70	11158,00	28930,00	29033,00	29989,00
700	2,70	11119,00	28872,00	28970,00	29999,00
1000	2,71	11074,00	28763,00	28860,00	29998,00
1200	2,72	11051,00	28720,00	28819,00	29998,00

Tabella 41 Ergebnistabelle Heliotherm HP12L-K-BC bei Vorlauftemperatur 60°C und Soll-Raumtemperatur 25°C (eigene Darstellung)

<b>Puffer-speicher [L]</b>	<b>SJAZ</b>	<b>Stromverbrauch Wärmepumpe [kWh]</b>	<b>Nutzenergie [kWh]</b>	<b>Energiebedarf [kWh]</b>	<b>Erzeugte Wärmeenergie [kWh]</b>
300	2,36	12634,00	28805,00	28893,00	29970,00
500	2,53	11841,00	28817,00	28921,00	29983,00
700	2,52	11836,00	28741,00	28842,00	29999,00
1000	2,52	11803,00	28628,00	28728,00	29999,00
1200	2,53	11826,00	28560,00	28669,00	29998,00