



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Sajjad Ebadi

Auslegung und Optimierung einer regenerativen Energieversorgung für ein Bürogebäude

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

I. Zusammenfassung

Sajjad Ebadi

Thema der Bachelorthesis

Auslegung und Optimierung einer regenerativen Energieversorgung für ein Bürogebäude

Stichworte

Energieversorgungssystem, Fernwärme, Wärmepumpe, PV-Anlage, PVT-Modul, CO₂-Ausstoß, Energieeffizienz, dynamische Simulation, Modelica, HKE-Sim

Kurzzusammenfassung

In dieser Arbeit wird das aktuelle Energieversorgungssystem, aus der Fernwärme und dem Stromnetz, der Büroräume der Firma ROM Technik untersucht, sowohl den thermischen als auch den elektrischen Verbrauch ermittelt. Als Alternative zu dem konventionellen System werden zwei CO₂-arme Energieversorgungssysteme entworfen und mit der Methode der Anlagensimulation dynamisch simuliert. Die erste Systemalternative besteht aus einer Luft-Wasser-Wärmepumpe in Kombination mit einer PV-Anlage. Die zweite Alternative ist eine Sole-Wasser-Wärmepumpe in Kombination mit einer PVT-Anlage.

Sajjad Ebadi

Title of the paper

Design and optimization of a renewable energy supply for an office building

Keywords

Energy supply system, district heating, heat pump, PV-system, PVT-module, CO₂ emissions, energy efficiency, dynamic simulation, Modelica, HKE-Sim

Abstract

In this thesis, the current energy supply system, from the district heating and the electricity grid, of the offices of the company ROM Technik is examined, both the thermal and the electrical consumption are determined. As an alternative to the conventional system, two low-CO₂ energy supply systems are designed and dynamically simulated using the system simulation method. The first alternative system consists of an air-to-water heat pump in combination with a PV system. The second alternative is a brine-to-water heat pump in combination with a PVT system.

II. Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Bachelorarbeit besteht darin, eine effiziente und nachhaltige sowie regenerative Energieversorgung für das Bürogebäude der Firma ROM Technik am Standort Hamburg zu konzipieren, indem verschiedene Aspekte der Energieerzeugung, und -nutzung optimiert werden. Die Arbeit soll die Herausforderungen bei der Integration erneuerbarer Energiequellen in das Referenzgebäude untersuchen und Lösungen entwickeln, um den Energiebedarf zu decken, die Kosten zu minimieren und die Umweltauswirkungen zu reduzieren.

Das Ziel wird unter Durchführung folgender Schritte erreicht:

1. Analyse des Energiebedarfs: Untersuchung des Energiebedarfs des Bürogebäudes.
2. Auswahl von geeigneten Energiequellen: der Fokus dieser Arbeit ist an Solarenergie zur Erzeugung vom Strom und Wärmepumpe zur Klimatisierung der Räumlichkeiten sowie das effiziente und nachhaltige Betreiben von Systemen
3. Auslegung der Energieerzeugungssysteme: Simulation und Optimierung der Energieerzeugungssysteme, um den Energiebedarf des Gebäudes zu decken.
4. Wirtschaftliche und ökologische Bewertung: wirtschaftliche und ökologische Analyse und Bewertung des untersuchten regenerativen Energieversorgungssystems.

III. Inhaltsverzeichnis

I.	Zusammenfassung	I
II.	Aufgabenstellung	II
III.	Inhaltsverzeichnis	III
IV.	Abbildungsverzeichnis	V
V.	Tabellenverzeichnis	VI
VI.	Abkürzungsverzeichnis	VII
1	Einleitung.....	1
1.1	Politische Anreize und Förderungen	2
1.1.1	Förderung für Wärmepumpen	2
1.1.2	Förderung für Solarthermie	3
1.1.3	Förderung für Photovoltaik	3
1.2	Ziel der Arbeit und Forschungsfrage	4
2	Beschreibung des Beispielgebäudes	5
2.1	Bewertung und Analyse des aktuellen Energieverbrauchs des Beispielgebäudes .	6
2.1.1	Wärmeverbrauch.....	6
2.1.2	Stromverbrauch.....	7
3	Systemkomponenten	8
3.1	Wärmepumpe	8
3.2	Photovoltaisch-thermische Solarkollektoren (PVT-Module).....	12
4	Aktuelle Forschungen und Untersuchungen:	15
5	Vorstellung der untersuchten Systemvarianten.....	22
6	Modellierung und dynamische Simulation	23
6.1	Beschreibung des verwendeten Tools	23
6.1.1	Modelica.....	23
6.1.2	Dymola.....	24
6.1.3	HKE-Sim	24
6.1.4	SunnyDesign.....	24
6.2	Simulierte Systeme	25

6.2.1	Modell des Referenzenergiesystems (FW):.....	25
6.2.2	Modell der bivalente Luft-Wasser-Wärmepumpe (WP_PV)	26
6.2.3	Model der solarunterstützten bivalenten Sole-Wasser-Wärmepumpe (WP_PVT)	27
6.3	Randbedingungen.....	30
7	Ergebnisse und Auswertung	32
7.1.1	Stromverbrauch, Stromerzeugung:.....	35
7.1.2	Jahresarbeitszahl	39
7.1.3	Bilanz des CO ₂ -Ausstoßes	39
7.1.4	Primärenergie:.....	41
7.1.5	Wirtschaftlichkeit	44
7.1.5.1	Investitionskosten:.....	44
7.1.5.2	Betriebskosten:.....	45
7.1.5.3	Amortisationszeit:	47
8	Bewertung und Analyse	50
9	Vorschläge für weitere Untersuchungen	51
10	Zusammenfassung	52
11	Ausblick	54
VII.	Literaturverzeichnis	55

IV. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lageplan ROM-Technik Hamburg [7].....	5
Abbildung 2: Verlauf der Temperaturverlauf am Standort Hamburg [8].....	7
Abbildung 3: Schema eines Wärmepumpenkreislaufes [10]	8
Abbildung 4: Abgedeckte PVT-Flachkollektor [14]	13
Abbildung 5: Nicht-abgedeckte PVT-Flachkollektor [14]	13
Abbildung 6: Vergleich der PVT-Kollektoren mit PV und Solarthermie [16].....	14
Abbildung 7: Schema des untersuchten Systems (SGSHP) [17]	16
Abbildung 8: Schema Anlagenvariante "Wärmepumpe Stand-Alone" [19].....	18
Abbildung 9: Schema Anlagenvariante "Wolf" [19]	19
Abbildung 10: Hydraulikschema Anlagenvariante Kombination [19]	20
Abbildung 11: Modell des Heizsystems FW.....	26
Abbildung 12: Modell des Heizsystem WP_PV.....	27
Abbildung 13: Model des WP_PVT.....	28
Abbildung 14_ PVT-Kollektoren [25].....	29
Abbildung 15: direkte und diffuse Solarstrahlung.....	31
Abbildung 16: Betrieb der WP und FW über ein Jahr.....	32
Abbildung 17: Verlauf der Leistung der WP und FW und Außentemperatur in einer Woche im Winter.....	33
Abbildung 18: Verlauf der Leistung der WP und FW und Außentemperatur in einer Woche im Sommer.....	33
Abbildung 19: PV-Anlage auf dem Dach des A-Gebäudes (erstellt in SunnyDesign).....	34
Abbildung 20: Stromerzeugung der PVT-Anlage	35
Abbildung 21: Vergleich der Stromlast FW vs. WP_PV	36
Abbildung 22: Stromproduktion gegen Stromverbrauch bei der PVT-Variante in der ersten Woche im Januar	37
Abbildung 23: Stromproduktion gegen Stromverbrauch bei der WP_PVT in der ersten Woche im Juli.....	38
Abbildung 24: CO2-Emission der Systeme.....	41
Abbildung 25: Primärenergien der untersuchten Systeme	43
Abbildung 26: Wirtschaftlichkeit der drei Varianten.....	49

V. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ergebnisse der drei untersuchten Modelle in der Dipolarbeit J. Plössing [19].....	21
Tabelle 2: Vergleich der Ergebnisse im Bezug auf Strom bei den drei Varianten.....	38
Tabelle 3: Vergleich der CO ₂ -Emission der drei Systemvarianten pro Jahr.....	40
Tabelle 4: Übersicht der verwendeten Primärenergiefaktoren [29]	42
Tabelle 5: Vergleich der Primärenergie der drei Varianten	43
Tabelle 6: Vergleich der Wirtschaftlichkeit der drei Systemvarianten.....	48

VI. Abkürzungsverzeichnis

kWh _{el} /a	Kilowattstunde elektrische Energie in einem Jahr
kWh _{th} /a	Kilowattstunde thermische Energie in einem Jahr
€/a	Euro im Jahr
ΔT	Temperaturunterschied
CO ₂	Kohlendioxid
COP	Coefficient of Performance
ct	<i>Cent</i>
DAEs	Differential-Algebraic Equations
FW	Fernwärme
g/kWh	Gramm pro Kilowattstunde
H _{max}	Spitzenleistung
JAZ	Jahresarbeitszahl, Jahresarbeitszahl
kg/a	Kilogramm pro Jahr
Kg/kWh.a	Kilogramm pro Kilowattstunde im Jahr
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
kWh/a	Kilowattstunden pro Jahr
kWp	<i>Kilowatt Peak</i>
MWh	Megawattstunde
MWh/a	Megawattstunden im Jahr
PV	Photovoltaik
PVT-Module	<i>photovoltaisch-thermischer Sonnenkollektor</i>
Q _{Wärme}	Wärmebedarf
SGSHP	<i>solar-assisted ground heat-pumps</i>
SPF	Seasonal Performance Factor
STC	Standard Test Conditions
T _{Aus}	Außentemperatur
T _{HG}	Heizgrenztemperatur
T _N	<i>Normaußentemperatur</i>
T _c	<i>Temperatur der Wärmequelle, Quelltemperatur</i>
TGA	<i>technischen Gebäudeausrüstung</i>
T _h	Vorlauftemperatur der Heizung, Temperatur der Heizung
TRY	Das Testreferenzjahr
W	Watt
W/m ²	Watt pro Quadratmeter
W _{el}	zugeführte elektrische Energie
WP	Wärmepumpe
η	<i>Effizienz, Effizienz (der Wärmepumpe)</i>

1 Einleitung

In den letzten Jahren ist das Bewusstsein für nachhaltige und umweltfreundliche Energieerzeugung gestiegen, bedingt durch die begrenzte Verfügbarkeit fossiler Energiequellen, steigende Energiekosten, den voranschreitenden Klimawandel und die damit verbundenen CO₂-Emissionen. Angesichts dieser Herausforderungen sind innovative Lösungen notwendig, um eine nachhaltige und regenerative Energieversorgung zu realisieren.

Eine Alternative zur konventionellen Heizsysteme sind Wärmepumpen. Durch Betreiben von Wärmepumpen mit erneuerbaren Energien, wird einen Beitrag zur Umweltschonung geleistet und vor künftige Verschärfung der Energiegesetze und Kostensteigerung der fossilen Energie geschützt.

Die Sonne ist eine unerschöpfliche Energiequelle, die uns zur Verfügung steht, die jedoch nicht ohne weiteres nutzbar ist. Um diese grüne Energie zu Nutzen muss die abgebende Energie von der Sonne mit Hilfe von unterschiedlichen Maßnahmen aufgenommen werden. Eine innovative Technologie in diesem Bereich ist die Nutzung der photovoltaisch thermischen Panels, die sogenannten PVT-Module. Diese vielversprechende Technologie kann die Sonnenenergie in Strom umwandeln und zugleich die Wärmeenergie für den Wärmeverbrauch nutzen. Mit der Integration einer Wärmepumpe mit PVT-Modulen kann der Strom- und Heizbedarf der Gebäude unterstützt werden und somit CO₂-arm und nachhaltig mit Energie versorgt werden.

In den vergangenen Jahren haben die regenerative Energieerzeugung und Energieeffizienz kontinuierlich an Bedeutung zugenommen. In der politischen Agenda werden verstärkt Klimaziele formuliert, und es werden Maßnahmen ergriffen, um diesen gerecht zu werden. Die rechtlichen Bestimmungen bezüglich der Energieeffizienz in Wohn- und Nicht-Wohngebäuden werden dabei immer restriktiver. Parallel dazu werden finanzielle Anreize geschaffen, um die Umsetzung von Maßnahmen zur Erreichung der Klimaneutralität zu unterstützen.

Zur Verwirklichung der energiebezogenen Ziele hat der Bund durch das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) verschiedene Gesetze erlassen, darunter das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), die Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) und das Gebäudeenergiegesetz (GEG). Die Überarbeitung des EEG im Jahr 2023 verfolgt dabei das Ziel eines umfassenden Ausbaus der erneuerbaren Energie. Im Energiebereich werden energieeffiziente Technologien und Maßnahmen zur Energieeinsparung sowie eine verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien beim Heizen gefördert.

Gemäß dem EEG 2023 wird ab dem 1. Januar 2024 in Neubaugebieten eine Verpflichtung eingeführt, mindestens 65 % der Heizenergie aus erneuerbaren Quellen zu beziehen [1].

Außerhalb von Neubaugebieten wird diese Regelung ab 2026 wirksam. Für Bestandsgebäude ergeben sich aufgrund großzügiger Übergangsfristen andere Bedingungen: Heizungsanlagen müssen nicht ersetzt werden, solange sie funktionsfähig sind oder durch Reparaturen standgesetzt werden können.

1.1 Politische Anreize und Förderungen

Die deutsche Politik sieht vor, klimaschädliche Emissionen bis 2030 um 65 % gegenüber 1990, bis 2040 um 88 % zu reduzieren und im Jahr 2045 Netto-Treibhausgasneutralität zu erreichen [2]. Zur Realisierung dieses Ziels werden diverse politische Maßnahmen ergriffen, darunter insbesondere die Förderung erneuerbarer Energien.

Ein Energieversorgungssystem für Wohn- oder Nichtwohngebäude profitiert laut dem EEG von Fördermaßnahmen für verschiedene Komponenten, darunter Wärmepumpen, Photovoltaik und Solarthermie. Die Förderung umfasst unter anderem digitale Systeme zur energetischen Betriebs- und Verbrauchsoptimierung für Nichtwohngebäude.

Die Förderung unterliegt jedoch bestimmten Bedingungen, die erfüllt werden müssen. Diese werden im Folgendem erläutert.

1.1.1 Förderung für Wärmepumpen

Für die Einführung einer Wärmepumpe gewährt die Bundesregierung einen finanziellen Basiszuschuss von 25 % für Anschaffung, Installation, Inbetriebnahme und begleitende Maßnahmen. Zusätzlich wird ein weiterer Zuschuss von 10 % gewährt, wenn eine ältere, jedoch funktionsfähige Gas-, Öl-, Kohle- oder Nachtspeicherheizung durch eine neue Wärmepumpe ersetzt wird. Die betreffende fossile Heizung muss bei Einreichung des Antrags mindestens 20 Jahre alt sein. Ein weiterer Bonus von 5 % wird vergeben, wenn die Wärmepumpe Wasser oder Erde als Wärmequelle nutzt, oder 5 %, wenn ein natürliches Kältemittel verwendet wird (seit 2023). Da die beiden letzten Bonusarten nicht miteinander kombinierbar sind, ergibt sich eine maximale Gesamtförderung von 40 %, begrenzt auf insgesamt 60.000 € pro Wohneinheit bei Wohngebäuden und bis 15.000.000 €, maximal 1.000 € pro Quadratmeter Netto-Grundfläche bei Nichtwohngebäuden [3].

Diese gelten sowohl für Privatpersonen als auch für Unternehmen, ausgenommen sind jedoch Unternehmen, die selbst ein Hersteller von förderfähigen Anlagen sind. Bei der Leistungsgröße der Wärmepumpe ist keine Obergrenze genannt. Die Förderbedingungen

werden aktuell stetig aktualisiert und überarbeitet, geben daher nur bedingte Planungssicherheit.

1.1.2 Förderung für Solarthermie

Die Errichtung oder Erweiterung von Solarthermieanlagen zur thermischen Nutzung wird gefördert, sofern sie vorrangig der Warmwasserbereitung und/oder Raumheizung, der Kälteerzeugung oder der Einspeisung von Wärme/Kälte in ein Wärme- oder Kältenetz dienen. Die Förderung beläuft sich auf bis zu 30 % der förderfähigen Kosten.

Die Solarthermie-Kollektoren müssen mit einem gültigen Solar-Keymark-Zertifikat ausgestattet sein. Das Solar Keymark ist eine Zertifizierung für solarthermische Produkte, insbesondere für Sonnenkollektoren, und orientiert sich an den europäischen Normen als Grundlage [4].

1.1.3 Förderung für Photovoltaik

Die Bestimmungen bezüglich der Förderprogramme für Photovoltaik-Anlagen variieren je nach Bundesland. Im Falle der Einspeisevergütung besteht jedoch landesweit Einheitlichkeit in Deutschland: Für die ersten 10 kWp einer PV-Anlage erfolgt eine Vergütung von 8,2 ct/kWh über einen Zeitraum von 20 Jahren. Für größere Anlagen mit einer Leistung von bis zu 40 kWp beträgt die Vergütung für die ersten 10 kWp 8,2 Cent pro kWh, während für den übrigen Teil der Anlagenleistung bis 40 kWp 7,1 Cent pro kWp angesetzt werden, was zu einem Durchschnitt von 7,8 Cent pro kWh führt. Diese Regelung gilt für Anlagen, die bis Januar 2024 in Betrieb genommen werden. Danach wird die Vergütung alle sechs Monate um 1 % reduziert. Ab einer Leistung von 40 bis 100 kWp wird mit 5,8 ct/kWh vergütet. Anlagen ab 100 kWp Leistung müssen direktvermarktet werden. Das ist sowohl für Überschusseinspeisung als auch bei Volleinspeisung der Fall [5].

Aufgrund des niedrigen Niveaus der Einspeisevergütung nimmt der Eigenverbrauch einen entscheidenden Stellenwert ein. Es wird angestrebt, den erzeugten Strom vorrangig selbst zu verbrauchen und nicht ins Netz einzuspeisen. Dies resultiert aus der Tatsache, dass der eingespeiste Strom zu vergleichsweise niedrigen Preisen verkauft werden muss, während gleichzeitig teurer Strom aus dem Netz bezogen wird [6].

1.2 Ziel der Arbeit und Forschungsfrage

Das übergeordnete Ziel dieser Abschlussarbeit ist eine optimale Auslegung einer regenerativen Energieversorgung für das Bürogebäude des Unternehmens „ROM-Technik“ in Hamburg mit der Methode Anlagensimulation in einem objektorientierten Programm „Dymola-Modelica“ unter Verwendung von der ROM-Technik Bibliothek „HKE-Sim“.

Dabei sollen sowohl der Strom- als auch der Wärmebedarf des Gebäudes effizient gedeckt und gleichzeitig der Einsatz fossiler Brennstoffe minimiert werden. Das Unternehmen mit dem Hauptsitz in Stuttgart und ca. 2300 Mitarbeiter deutschlandweit ist in der Gebäudetechnik, im Anlagenbau und Service deutschlandweit tätig.

Die vorliegende Bachelorarbeit verfolgt das Ziel, fundierte Lösungsansätze und Empfehlungen für eine effiziente und nachhaltige Energieversorgung am Beispiel eines sanierten Bürogebäudes mittlerer Größe zu entwickeln. Hierbei werden sowohl technische Aspekte wie die Auslegung der Anlagenkomponenten als auch ökonomische und ökologische Gesichtspunkte eingehend analysiert. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen als Grundlage für zukünftige Planungen und Implementierungen von regenerativen Energieversorgungssystemen dienen.

Forschungsfrage in dieser Arbeit ist: welche spezifischen Maßnahmen und Technologien sind erforderlich, um ein Energieversorgungssystem mit konventioneller Wärme- und Stromversorgung durch ein nachhaltiges und regeneratives Energieversorgungssystem aus einer Wärmepumpe und PV- bzw. PVT-Anlage zu ersetzen und inwiefern können die betrachteten auf Umwelt- und Solarenergie basierenden Systeme den Bedarf eines Bürogebäudes decken?

2 Beschreibung des Beispielgebäudes

In dieser Arbeit wird das Hauptgebäude der Firma „ROM-Technik“ des Standorts Hamburg untersucht. Die Hamburger Niederlassung der ROM-Technik verfügt über fünf Gebäude. In Abbildung 1 sind die Gebäude ersichtlich. Die gelbgekennzeichneten D-Gebäude bestehen aus einem Versuchslabor und wenigen Büroräumen. Die rot gekennzeichneten Gebäude sind die Hauptgebäude und bestehen aus Büroräumen und einem Lagerbereich. Da die Hauptgebäude (A, B und C) viel größer als die D-Gebäude sind und die meisten Mitarbeiter darin platziert sind, wird in dieser Arbeit nur die rot gekennzeichneten Hauptgebäude betrachtet. Im Folgenden werden Gebäude A, B und C als Referenzgebäude bezeichnet.



Abbildung 1: Lageplan ROM-Technik Hamburg [7]

Die Gebäuden A und B wurden im Jahr 1965 gebaut und 2017 saniert. Das A-Gebäude erstreckt sich über 5 Etagen. Das C-Gebäude wurde in den 20er Jahren errichtet, jedoch 2021 saniert und besteht aus 3 Etagen. Bei der Sanierung erfolgte eine Erneuerung der Fenster und der Fassade beider Objekte. In den Gebäuden sind verschiedene Firmen sesshaft, es wird jedoch nur der Teil betrachtet, der von den Mitarbeitern der Firma ROM-Technik genutzt wird. Dieser Teil umfasst insgesamt 2.103 m^2 und wird von 170 Mitarbeitern genutzt. Die Büroflächen sind während der üblichen Arbeitszeiten zwischen 7 und 19 Uhr an Wochentagen besetzt und an Wochenenden sowie an Feiertagen geschlossen.

Das derzeitige Heizsystem des Gebäudes nutzt Fernwärme ausschließlich für die Beheizung der Räumlichkeiten, während für die Warmwasserversorgung Durchlauferhitzer verwendet werden. Im Sommer erfolgt die Kühlung einiger Räume über Umluftgeräte.

Für die PV-, bzw. PVT-Anlage wird das Dach des A-Gebäudes benutzt. Die Kantenlängen des A-Gebäudes sind quaderförmig und betragen 32 m, ergänzt durch einen gleichkantigen Dachaufbau von 16 m. Aufgrund von technischen Anlagen auf dem Dach kann nicht die gesamte Fläche von 1.280 m² für die Auslegung der PVT-Module genutzt werden. Abzüglich der Hindernisse steht eine Nettogesamtfläche von 646 m² zur Verfügung.

2.1 Bewertung und Analyse des aktuellen Energieverbrauchs des Beispielgebäudes

In diesem Kapitel werden sowohl der Stromverbrauch als der Wärmeverbrauch des Beispielgebäudes ermittelt.

2.1.1 Wärmeverbrauch

Für die Heizlast in dieser Untersuchung erfolgt eine Modellierung eines Heizlastprofils mit einem vereinfachten Ansatz auf der Basis linearer Abhängigkeit von der Außentemperatur. Da der jährliche Wärmeverbrauch bekannt ist, wird die Heizlast mithilfe einer plausiblen Annahme nach Gleichung (1) linear interpoliert. Das Energieaudit von 2021 ergab, dass der Standort Hamburg einen Wärmeverbrauch von etwa 373 MWh/a für die Gebäude A bis D aufweist. Für die betrachteten Beispielgebäude wird ein Wert von 300 MWh/a angenommen. Der stündliche Wärmebedarf

$$Q_{\text{Wärme}} = \left[1 - \frac{T_{\text{Aus}} - T_{\text{N}}}{T_{\text{HG}} - T_{\text{N}}} \right] \cdot H_{\text{max}} \quad (1)$$

wird unter Annahme der stündlichen Außentemperatur T_{Aus} , der Normaußentemperatur $T_{\text{N}} = -10$ °C, der Heizgrenztemperatur $T_{\text{HG}} = 14$ °C und Spitzenleistung $H_{\text{max}} = 150$ kW angenähert. Dabei ist die Normaußentemperatur T_{N} die niedrigste Zweitagesmittelwert, der zehnmal in den letzten 20 Jahren erreicht oder unterschritten wurde. Die Heizgrenztemperatur T_{HG} besagt, unter welcher Außentemperatur muss geheizt werden. Die Spitzenleistung H_{max} ist die maximale Heizleistung, die die Wärmequelle haben muss, wenn im Gebäude keine Wärmelast vorhanden ist.

Der Verlauf der Außentemperatur über ein gesamtes Jahr wurde mithilfe des frei verfügbaren Testreferenzjahres (TRY) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) aus dem Jahr 2015 für den Standort Hamburg erfasst. Abbildung 2 zeigt den Verlauf der Außentemperatur über ein ganzes Jahr. Das TRY betrachtet den Verlauf der Außentemperatur des Standorts Hamburg für den Zeitraum von 1995 bis 2012 und wurde 2015 zur Verfügung gestellt [8].

stündliche Temperaturverlauf anhand TRY 2015

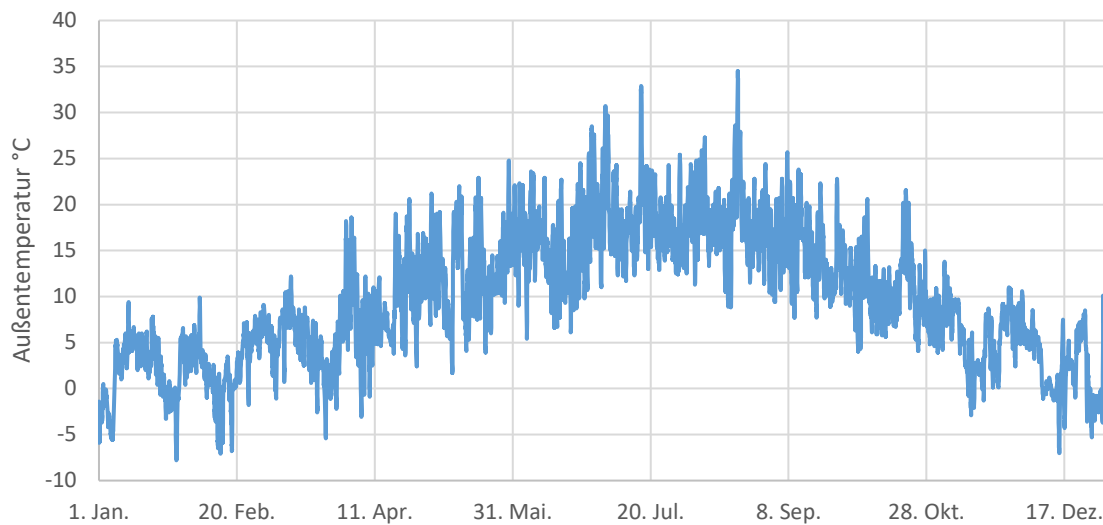


Abbildung 2: Verlauf der Temperaturverlauf am Standort Hamburg [8]

2.1.2 Stromverbrauch

Für den Standort Hamburg stehen drei Stromzähler zur Verfügung. Aufgrund der begrenzten Möglichkeit einer präzisen Trennung des Verbrauchs für die einzelnen Gebäude wird der Stromzähler mit größeren Ablesewerten den größeren Gebäuden zugeordnet. Die gemessenen Werte des Zählers liegen in Viertelstundenabständen vor. Der Gesamtstromverbrauch für das Referenzjahr 2022 beträgt 97.707 kWh/a. Für ein Bürofläche ist ein Wert zwischen 40 und 70 kWh/m²a üblich [9]. Der Verbrauch des betrachteten Bürogebäudes mit einer Fläche von 2.103 m² Nutzfläche ist mit 46,46 kWh/m².a demnach ein realistischer Wert.

3 Systemkomponenten

Für die Bereitstellung der thermischen und elektrischen Energie sind verschiedene Komponenten nötig. Im Folgenden werden auf die Hauptkomponente solcher Systeme eingegangen.

3.1 Wärmepumpe

Eine Wärmepumpe ist ein effizientes Gerät zur Erzeugung von Wärme für Heizsysteme. Sie extrahiert thermische Energie aus einer Quelle und pumpt sie auf ein höheres Temperaturniveau, das dann für das Beheizen von Räumen und/oder die Bereitstellung von Warmwasser genutzt wird. In technischer Hinsicht ähnelt die Wärmepumpe einer Kompressionskältemaschine, wobei der Hauptunterschied in den Temperaturniveaus und der Anwendung besteht. Sie besteht aus den gleichen Grundkomponenten, nämlich Verdampfer, Verdichter, Kondensator und Expansionsventil, wie in der Abbildung 9 dargestellt.

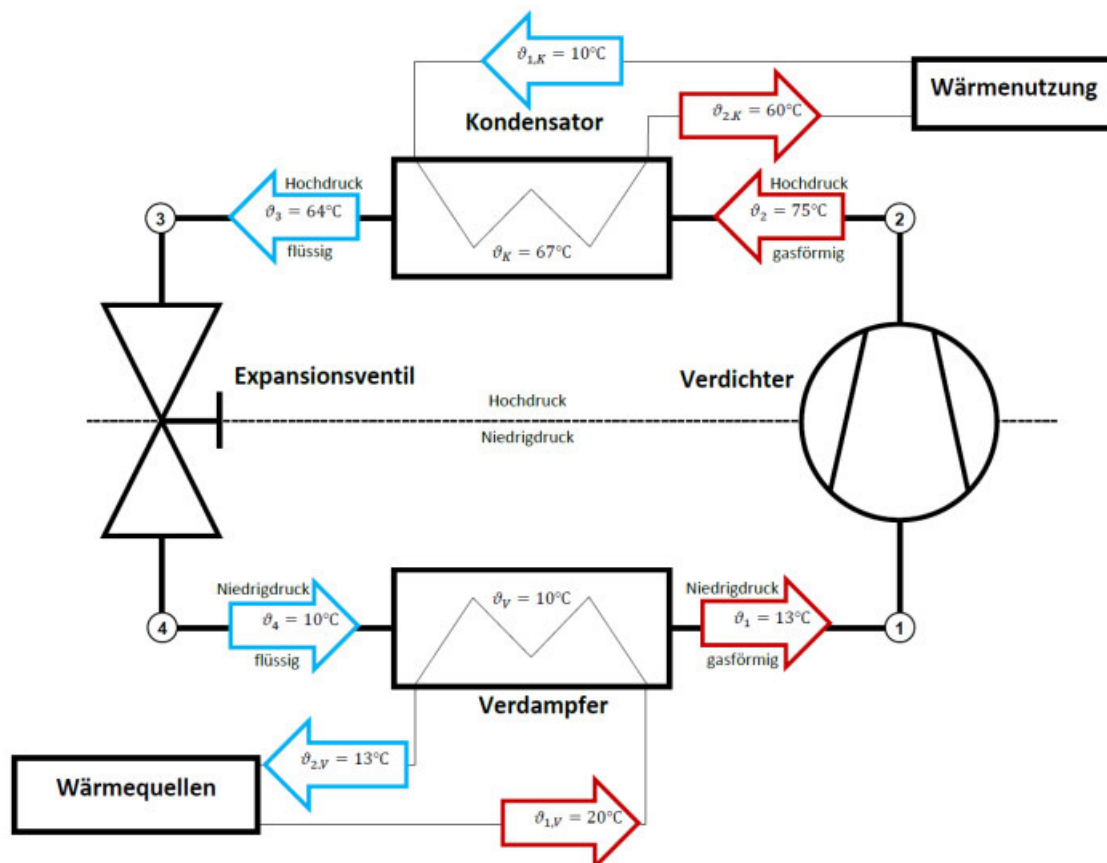


Abbildung 3: Schema eines Wärmepumpenkreislaufes [10]

Der Verdampfer nimmt Wärme aus der Umgebung auf (4 → 1), wodurch das Kältemittel bei niedriger Temperatur und niedrigem Druck verdampft. Im Verdichter wird das gasförmige Kältemittel auf ein hohes Druckniveau komprimiert (1 → 2), wodurch der Druck und die Temperatur steigen. Im Kondensator gibt das Kältemittel die aufgenommene Wärme an das Heizsystem ab und verflüssigt sich (2 → 3). Das Expansionsventil senkt den Druck und die Temperatur des Arbeitsmittels (3 → 4), wodurch das Fluid verdampft und der Kreislauf von vorne beginnt.

Bei Wärmepumpen spielt das Kennzahl COP (coefficient of performance) eine sehr wichtige Rolle. Diese Zahl gibt die Auskunft darüber, wie effizient eine Wärmepumpe ist und wird nach der Gleichung 2 definiert.

$$COP = \frac{\text{erzeugte Wärme}}{\text{aufgewendete Energie}} \quad (2)$$

Die erzeugte Wärme entspricht dem Nutzen und die aufgewendete Energie ist der Aufwand, der in der Regel elektrische Energie ist. Eine Wärmepumpe hat eine COP von größer als 1 und somit gibt er mehr thermische Energie ab, als sie elektrische Energie für ihren Betrieb braucht. Das liegt daran, dass eine Wärmepumpe die, in der Regel von der Umwelt zur Verfügung stehende thermische Energie aufnimmt. Bei einer COP von beispielsweise 4, nimmt die Wärmepumpe 1 Einheit elektrische Energie und 3 Einheiten thermische Energie auf und stellt 4 Einheiten thermische Energie zur Verfügung.

Eine weitere Gleichung, die die Effizienz einer Wärmepumpe besser darstellen kann, ist die Gleichung (3). Anhand dieser Gleichung ist zu erkennen, dass je wärmer die Quelltemperatur ist und je weniger ΔT bzw. der Unterschied zwischen der Vorlauftemperatur der Heizung (T_h) und der Temperatur der Wärmequelle der Wärmepumpe (T_c) ist, umso größer wird die Effizienz der Wärmepumpe [11].

$$\eta = T_h / (T_h - T_c) \quad (3)$$

Beim Vergleich einer Wärmepumpe ist die Jahresarbeitszahl eine wichtige Größe, um die Effizienz des Heizsystems zu bestimmen. Diese Kennzahl ist im Allgemeinen das Verhältnis der gewonnenen Energie zur aufgewendeten Energie. Mit anderen Worten beschreibt dieser Wert das Verhältnis von bereitgestellter Wärmenergie zu der dafür verbrauchten, in der Regel elektrischen, Energie. Diese Zahl wird unter realen Bedingungen und über einen Zeitraum von einem gesamten Jahr gemessen. Außerdem ist die Jahresarbeitszahl abhängig vom individuellen Nutzungsverhalten, daher kann sie nicht vom Hersteller vor der Inbetriebnahme ermittelt werden.

Die Berechnung der jahresarbeitszahl erfolgt nach der Gleichung (4) [12].

$$JAZ = \frac{\int_1^{365} Q_{con} [kWh]}{W_{el.} [kWh]} \quad (4)$$

JAZ ist das Verhältnis der abgegebenen Wärmeenergie (Q_{con}) über ein gesamtes Jahr zu zugeführte elektrische Energie (W_{el}) für den Betrieb der Wärmepumpe über ein gesamtes Jahr.

Die Einteilung von Wärmepumpen kann nach verschiedenen physikalischen Verfahren der Wärmeerzeugung bzw. Temperaturerhöhung erfolgen. Dabei werden sie in Kompressions-, Absorptions- und Adsorptionswärmepumpen unterteilt. In dieser Arbeit wird die erste Variante, nämlich die Kompressionswärmepumpe, betrachtet.

Eine Wärmepumpe kann mit unterschiedlichen Wärmequellen arbeiten. Dabei sind die gängigsten Methoden wie folgt aufgeführt, wobei das erste Element die Wärmequelle und das zweite die Wärmesenke repräsentiert:

- Luft-Wasser-Wärmepumpe
- Sole-Wasser-Wärmepumpe
- Wasser-Wasser-Wärmepumpe
- Solarunterstützte Sole-Wasser-Wärmepumpe

Luft-Wasser-Wärmepumpen:

Diese Art von Wärmepumpen nutzt die Außenluft als Wärmequelle. Ein Problem solcher Systeme liegt einerseits in ihrer geringen Effizienz, bedingt durch die niedrige Energiedichte der Luft und die niedrigen Außentemperaturen im Winter. Obwohl diese Wärmepumpen auch bei Temperaturen bis -5 °C Wärme aus der Außenluft entnehmen können, reicht dies allein für die Auslegung eines Heizsystems oft nicht aus.

Auf der anderen Seite ist der Betrieb einer Luft-Wärmepumpe aufgrund von Kompressor- und Ventilatorgeräuschen mit Geräuschemissionen verbunden, was die Anwendung solcher Systeme, insbesondere in Wohngebäuden, einschränkt. Jedoch sind neuere Luft-Wasser-Wärmepumpen in der Regel geräuschoptimiert und auch in Wohnsiedlungen gut anwendbar.

Es existieren Systemlösungen, die den Wärmepumpenbetrieb energieeffizienter und geräuscharmer gestalten. Beispielsweise kann anstelle der Außenluft die Abluft des Gebäudes genutzt werden. Bei Vorhandensein eines Kellers kann das Gerät dort platziert werden, um möglicherweise die Geräuschbelastung zu minimieren.

Sole-Wasser-Wärmepumpe:

Eine Sole-Wasser-Wärmepumpe arbeitet mit einem Solekreislauf auf der Verdampferseite. Auf der Verdampferseite zirkuliert eine Wasser-Glykol-Mischung (Sole). Diese Mischung absorbiert Wärme von der Erde und gibt die Wärme über einen Wärmetauscher an das

Arbeitsmittel. Nachdem das Arbeitsmittel auf ein höheres Temperaturniveau gepumpt wird, wird die Wärme in einem Wärmetauscher den Heizkörper oder an die Fußbodenheizung weitergegeben.

Diese Art von Wärmepumpen weisen in der Regel eine höhere Effizienz auf, da sie Erdwärme als Wärmequelle nutzen. Im Gegensatz zur Lufttemperatur unterliegen die Temperaturen im Erdreich keinen erheblichen Schwankungen. Bei einer Tiefe von etwa 15 Metern herrscht das ganze Jahr über eine nahezu konstante Temperatur von etwa 10 °C. Erdkollektoren können ebenfalls genutzt werden, indem sie in 1-2 Metern Tiefe großflächig waagrecht und schlangenförmig unter der Erdoberfläche verlegt werden. Der Nachteil dieser Art von Wärmepumpen sind die hohen Kosten für die Tiefenbohrung für das Einbringen der Erdsonde. Darüber hinaus wird für die Bohrung eine Genehmigung der Behörden benötigt. Außerdem ist eine Bohrung nicht in allen Orten realisierbar oder erlaubt.

Wasser-Wasser-Wärmepumpe:

Bei einer Wasser-Wasser-Wärmepumpe wird die Wärme des Grundwassers genutzt, um ein Kältemittel zu verdampfen. In der Regel erreichen Wärmepumpen dieser Art höhere Jahresarbeitszahlen (JAZ). Das Grundwasser verfügt das ganze Jahr über einen fast konstanten Temperaturbereich von 8 bis 12 °C. Bei dieser Art der Wärmepumpe sind zwei Brunnen notwendig, einen Saufbrunnen, der das Grundwasser entnimmt und einen Sickerbrunnen, der das Grundwasser zurückführt. Die zwei Brunnen sind für einen stetigen Grundwasser-Kreislauf zur Wärmepumpe verantwortlich. Wasser-Wasser-Wärmepumpen sind aufgrund von aufwendigen Brunnenbohrungen sogar etwas teurer als die Sole-Wasser-Wärmepumpen. Wie Sole-Wasser-Wärmepumpen kann und darf diese Variante nicht überall umgesetzt werden und benötigt ebenso Genehmigungen der Behörden.

Solarunterstützte Wärmepumpen:

Eine vielversprechende Alternative zu den genannten Systemen ist die Verwendung von solarunterstützten Wärmepumpen. Bei dieser Variante werden thermische Kollektoren benutzt, die die Wärmeenergie der Sonne als Wärmequelle für die Wärmepumpe verwenden. Dies ermöglicht die Einsparung einer Bohrung in die Erde. Der Betrieb einer Sole-Wasser-Wärmepumpe in Verbindung mit Kollektoren als Wärmequelle erfolgt geräuscharm.

Die Schwierigkeit solcher Wärmepumpensysteme liegt darin, dass sie im Winter, insbesondere an sehr kalten Tagen und bei Abwesenheit von Sonnenstrahlung, möglicherweise nicht ausreichend Wärme über die Solarthermie für die Wärmepumpe bereitstellen können. In solchen Situationen ist die Solarthermie allein möglicherweise nicht als einzige Wärmequelle für die Wärmepumpe geeignet.

Eine Lösung zur Steigerung der Effizienz solcher Wärmepumpensysteme ist die Implementierung eines bivalenten Systems. Bei einem solchem System wird in der Regel eine kleinere Wärmepumpe ausgewählt, die den Großteil des Heizbedarfs abdecken kann. Für sehr kalte Wintertage oder Zeiten ohne ausreichende Sonneneinstrahlung kommt ein anderer Wärmeerzeuger zur Unterstützung zum Einsatz. Die Planung erfolgt nicht nach der Normaußentemperatur (z.B. -10 °C), sondern orientiert sich am Bivalenzpunkt (z.B. -5 °C). Das Ziel ist es, die Wärmepumpe so auszulegen, dass sie ca. 80% bis 90% des Wärmebedarfs abdeckt, während die restlichen 10% bis 20% durch einen zweiten Wärmeerzeuger bereitgestellt werden. Diese Strategie ermöglicht eine effizientere Nutzung der Wärmepumpe und gewährleistet eine zuverlässige Beheizung bei allen äußeren Bedingungen [13].

Aus diesem Grund sind viele Heizsysteme mit Wärmepumpen als Wärmeerzeuger, insbesondere Luft-Wasser-Wärmepumpen, mit einem sogenannten Heizstab ausgestattet, der elektrische Strom bei Bedarf direkt in Wärme umwandelt bzw. den Verdampfer unterstützt. Der Heizstab wird in der Regel im Speicher (Pufferspeicher oder Warmwasserspeicher platziert). Dies dient als eine Art Backup-Heizung, um die Wärmeversorgung sicherzustellen, wenn die Hauptwärmequelle nicht ausreicht, beispielsweise in sehr kalten Wintertagen oder bei geringer Sonneneinstrahlung.

3.2 Photovoltaisch-thermische Solarkollektoren (PVT-Module)

PVT-Module (auch Hybrid-Module) ähneln äußerlich üblicherweise Photovoltaik-Modulen, weisen jedoch einen entscheidenden Unterschied auf: Unterhalb der Photovoltaik-Schicht befinden sich Wärmekollektoren, auch bekannt als Solar- oder Sonnenkollektoren. Üblicherweise bestehen diese Kollektoren aus Rohren, in denen Wasser oder ein Wasser-Glykol-Gemisch zirkuliert und durch die Einwirkung von Sonnenstrahlung Wärme absorbiert. Diese gewonnene Wärme kann anschließend entweder direkt in einen Speicher geleitet oder als vollständige oder partielle Wärmequelle für eine Wärmepumpe genutzt werden.

PVT-Module lassen sich in abgedeckte und nicht abgedeckte Varianten unterteilen. Abgedeckte Module sind mit einer Glasscheibe ausgestattet und darauf ausgerichtet, den höchstmöglichen Stromertrag zu erzielen. Sie eignen sich besonders für Anwendungen, bei denen die Stromerzeugung im Vordergrund steht.

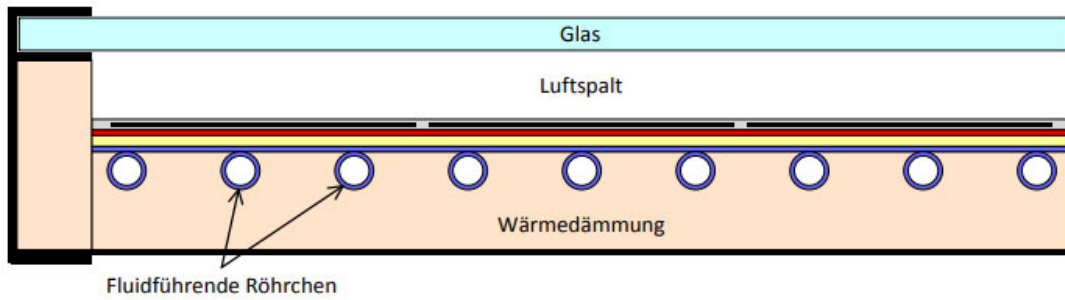


Abbildung 4: Abgedeckte PVT-Flachkollektor [14]

In Abbildung 4 ist eine schematische Darstellung eines typischen flüssiggekühlten abgedeckten PVT-Flachkollektors zu sehen.

Im Gegensatz dazu sind nicht-abgedeckte PVT-Module, WISC (Wind and Infrared Sensitive Collector), darauf ausgelegt den höchstmöglichen Wärmeertrag zu erzielen. Diese Module können als alleinige Quelle für Wärmepumpen dienen, da sie Umgebungswärme effizient nutzen können.

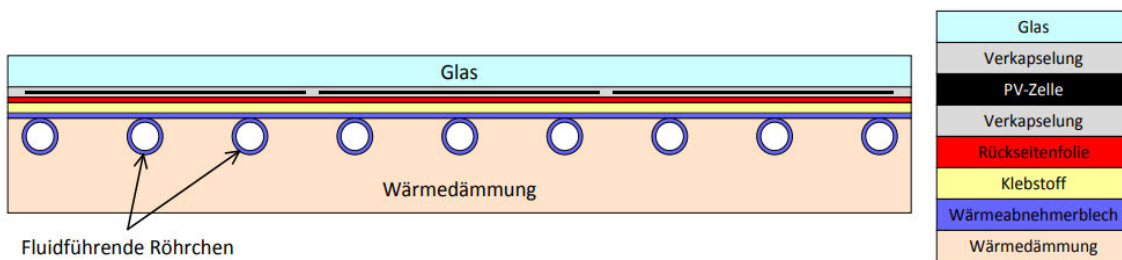


Abbildung 5: Nicht-abgedeckte PVT-Flachkollektor [14]

Abbildung 5 zeigt eine schematische Darstellung eines typischen flüssiggekühlten nicht-abgedeckten PVT-Flachkollektors.

Abgedeckte Module können ebenfalls als Wärmequelle für Wärmepumpen dienen, jedoch sind sie in der Regel nicht als alleinige Wärmequelle geeignet [15].

Für die Belegung einer Dachfläche bei einem Gebäude zwecks Energieversorgung ergeben sich unterschiedlichen Möglichkeiten. Anstelle von PVT-Modulen kann die vorhandene Fläche auch mit PV-Modulen und Solarpanelen nebeneinander belegt werden. Das Fraunhofer-Institut ISE (Institut für Solare Energiesysteme) führt dazu eine Forschungsprojekt durch. In einem Pilotprojekt namens „PVTgen2-optimierte PVT-Kollektoren“ für die kombinierte Strom- und Wärmeerzeugung, wurde eine Fläche von 42 m² mit 29 m² Solarpanelen neben

13 m² PV-Modulen belegt, um eine Erzeugung von 22 MWh thermischer Energie sicherzustellen [16]. In einem anderen Szenario wurde dieselbe Fläche vollständig mit PVT-Kollektoren belegt. Wie in der Abbildung 6 ersichtlich ist, bietet die zweite Möglichkeit mit 5,8 MWh eine mehr als doppelt so hohe elektrische Energieausbeute.

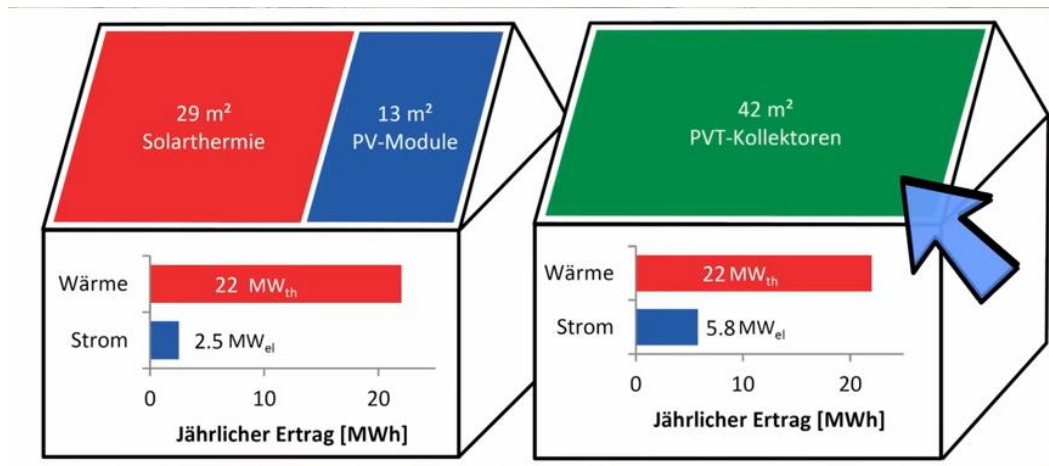


Abbildung 6: Vergleich der PVT-Kollektoren mit PV und Solarthermie [16]

Ein weiterer Vorteil von PVT-Modulen im Vergleich zu normalen PV-Modulen ist, dass die Photovoltaikschicht durch Wärmetransport über die darunter liegenden solarthermischen Module abgekühlt werden und somit der Wirkungsgrad der PV-Module erhöht wird, denn der Wirkungsgrad der PV-Module wird durch die hohen Temperaturen reduziert. Dies setzt voraus, dass eine Wärmesenke im System vorhanden ist, die auch in warmen Tagen die Wärme aufnimmt.

4 Aktuelle Forschungen und Untersuchungen:

Diverse Studien und Forschungsprojekte befassen sich mit der Optimierung von Energieversorgungssystemen mit Wärmepumpen in Kombination mit solarer Unterstützung. Die nachfolgend aufgeführten Arbeiten sind jedoch besonders relevant und detailliert, da sie umfassendere Informationen über das zu untersuchende System liefern.

Girard et al. [17] untersuchten die Erweiterung eines Heizsystems durch Integration von Solarkollektoren in Verbindung mit einer Wärmepumpe. Die Studie wurde im Jahr 2013 in Chile durchgeführt und erstreckte sich über 19 verschiedene europäische Städte. Das untersuchte System, siehe Abbildung 5, setzt sich aus einer handelsüblichen Sole-Wasser-Wärmepumpe und einem Erdkolektor zusammen, der in einer Tiefe von 2 Metern im Erdreich platziert ist. Abschließend wird die Wärmepumpe mit zwei Solarkollektoren und einem Pufferspeicher verbunden, um die Effizienz der Wärmepumpe und des Gesamtsystems bei der Bereitstellung einer zusätzlichen Wärmequelle zu steigern. Das Fluid im Erd/Solar-Kreislauf ist eine Wasser-Glykol-Mischung mit 35 % Glykol-Anteil. Das System ohne solare Unterstützung ist „GSHP“ (ground-source heat pump) und „SGSHP“ (solar-assisted ground heat-pumps) genannt [17].

Das Fluid zirkuliert durch die Erdsonden und erreicht die Solarpaneele erst dann, wenn ausreichende Solarstrahlung vorhanden ist. Andernfalls wird die durch das Erdreich gewonnene Wärme direkt in den Verdampfer der Wärmepumpe geleitet, ohne durch die Solarpaneele zu fließen. Sobald die Temperatur der Sole-Mischung die maximal zulässige Temperatur für die Wärmepumpe erreicht und gleichzeitig ausreichend Solarstrahlung vorhanden ist, wird die überschüssige Wärme in einem Pufferspeicher gespeichert. Dies ermöglicht die Nutzung der zusätzlichen Wärme zu späteren Zeitpunkten, in denen die Solarenergie nicht ausreichend verfügbar ist, beispielsweise während der Nachtstunden.

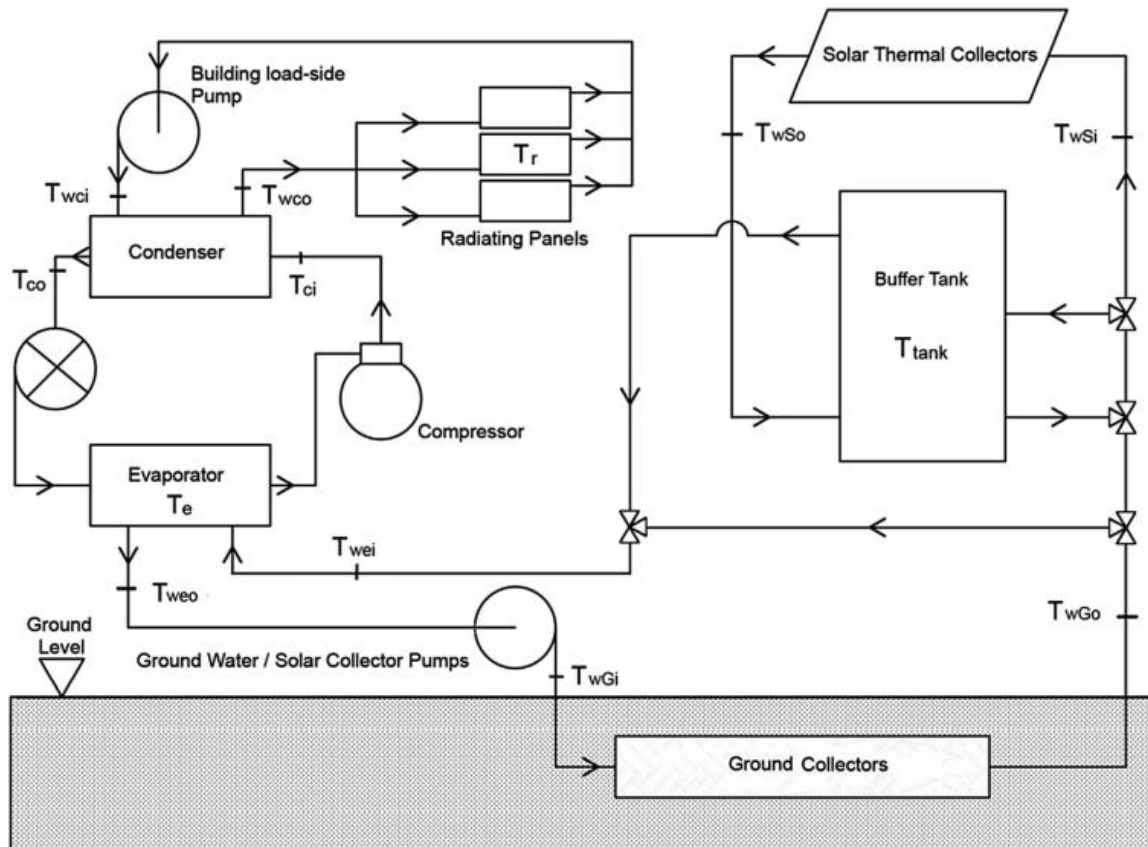


Abbildung 7: Schema des untersuchten Systems (SGSHP) [17]

Girard et. Al. entwickeln ein mathematisches Modell als ein Programmiercode. Alle Randbedingungen für Simulation von den 19 Städten sind bis auf Standortklima gleich, z.B. gleiches Gebäude, gleiche Wärmepumpe, Solarpanelle, Komponente, Erdbestandteile, usw.

Die Leistungskoeffizient (COP) des Gesamtsystems ist in Hamburg mit 4,648 (für die Erdsonden-Wärmepumpe ohne solare Unterstützung 4,428) deutlich niedriger als der entsprechende Wert in Madrid mit 5,288 (für die Erdsonden-Wärmepumpe ohne solare Unterstützung 4,726). Dies bedeutet eine Verbesserung von etwa 5 % in Hamburg und 12 % in Madrid. Der Raumwärmebedarf beträgt in Hamburg 14.490 kWh_{th}/a und in Madrid 9.544 kWh_{th}/a. Ein weiterer entscheidender Aspekt ist der jährliche elektrische Verbrauch des Systems. Dieser beläuft sich in Hamburg auf 3.117 kWh_{el}/a für das System mit solarer Unterstützung und 3.272 kWh_{el}/a für das System ohne Solar. In Madrid beträgt dieser Wert 1.805 kWh_{el}/a mit Solar und 2.020 kWh_{el}/a ohne solare Unterstützung. Im Rahmen dieser Simulation wird auch eine Wirtschaftlichkeitsrechnung durchgeführt, die eine Amortisationszeit von 9,0 Jahren ohne solare Unterstützung und 6,2 Jahren mit solarer Unterstützung für Hamburg zeigt. In Madrid belaufen sich die entsprechenden Werte auf 13,2 Jahre ohne solare Unterstützung und 9,2 Jahre mit Solar. Die Heizkostensparnis hängt wiederum stark vom Standort ab, wobei sie in kälteren Orten deutlich geringer ist als in südlicheren bzw. wärmeren Gegenden. In Bergen beträgt die Einsparung ca. 2 %, während dieser Wert für Hamburg bei

etwa 13 % liegt. Die Preise beziehen sich auf das Jahr 2013 und sind für alle Standorte einheitlich in Euro angegeben.

Mette et. al. [Mette, 2010] führen einen Vergleich von drei Systemvarianten durch, um den Mehrwert der Verbindung von Solarwärme und einer Wärmepumpe zu analysieren. Das erste System besteht ausschließlich aus einer Wärmepumpe. Im zweiten System sind eine Wärmepumpe, ein Solarkollektor und ein Pufferspeicher integriert. Die Wärmepumpe und der Solarkollektor arbeiten parallel, ohne direkte Interaktion. Im dritten System hingegen interagieren die Wärmepumpe und der Solarkollektor miteinander. Hierbei kann der Pufferspeicher sowohl zur Anhebung der Quelltemperatur als auch als alternative Wärmequelle genutzt werden.

Im Vergleich zum reinen Wärmepumpensystem lässt sich eine Einsparung des Stromverbrauchs von etwa 32 % bei der Anlage mit einer Kombination aus Wärmepumpe und Solarwärme erwarten. Wenn jedoch keine Interaktion zwischen Solarwärme und Wärmepumpe stattfindet – das heißt, wenn die Solarwärme direkt in den Pufferspeicher geleitet wird – beträgt die Einsparung etwa 24,5 %. Eine Verbesserung der Gesamtsystemeffizienz zeigt sich bei Nutzung der Solarthermie im System, gemessen an der Jahresarbeitszahl (JAZ) für das Heizsystem. Die JAZ beträgt 5,7 und 5,2 mit Interaktion im Vergleich zu 3,9 ohne Solar, was auf eine erhöhte Effizienz des Gesamtsystems hinweist [18].

In seiner Diplomarbeit legt Plössing [19] den Schwerpunkt seiner Studie auf die Verbesserung der Effizienz von Wärmepumpen. Um dies zu analysieren, wird in erster Linie drei verschiedene Systeme im Programm „Polysun“ simuliert und miteinander verglichen [19].

In dieser Untersuchung wird ein standardisiertes Neubau Einfamilienhaus mit 150 m² beheizte Wohnfläche angenommen, die den Anforderungen der EnEV 2007 von 50 kWh/m² entspricht. Der Warmwasserbedarf wird für einen 4-Personen-Haushalt angenommen, mit einem täglichen Verbrauch von 200 Litern (50 Liter pro Person und Tag bei 50 °C) und einem spezifischen Energiebedarf von 22 kWh/m². a. Dabei liegt der Hauptbedarf für Warmwasser in den Abendstunden. Das Heizungssystem ist dafür ausgelegt, um den Gesamtbedarf von 11.550 kWh pro Jahr decken. Als Standort wird ein Ort in der Nähe des Münchener Flughafens gewählt. In allen Szenarien wird eine Sole-Wasser-Wärmepumpe mit einer Erdwärmesonde eingesetzt.

Die erste Anlagevariante heißt „Wärmepumpe Stand-Alone“. Bei dieser Variante muss die Wärmepumpe ohne solare Unterstützung den gesamten Wärmebedarf des Gebäudes abdecken. Die Wärmepumpe kann je nachdem, mit einem 3-Wegventil entweder den Heizkreis aktivieren oder den Warmwasserspeicher beladen. Abbildung 8 zeigt das Schema dieses Systems.

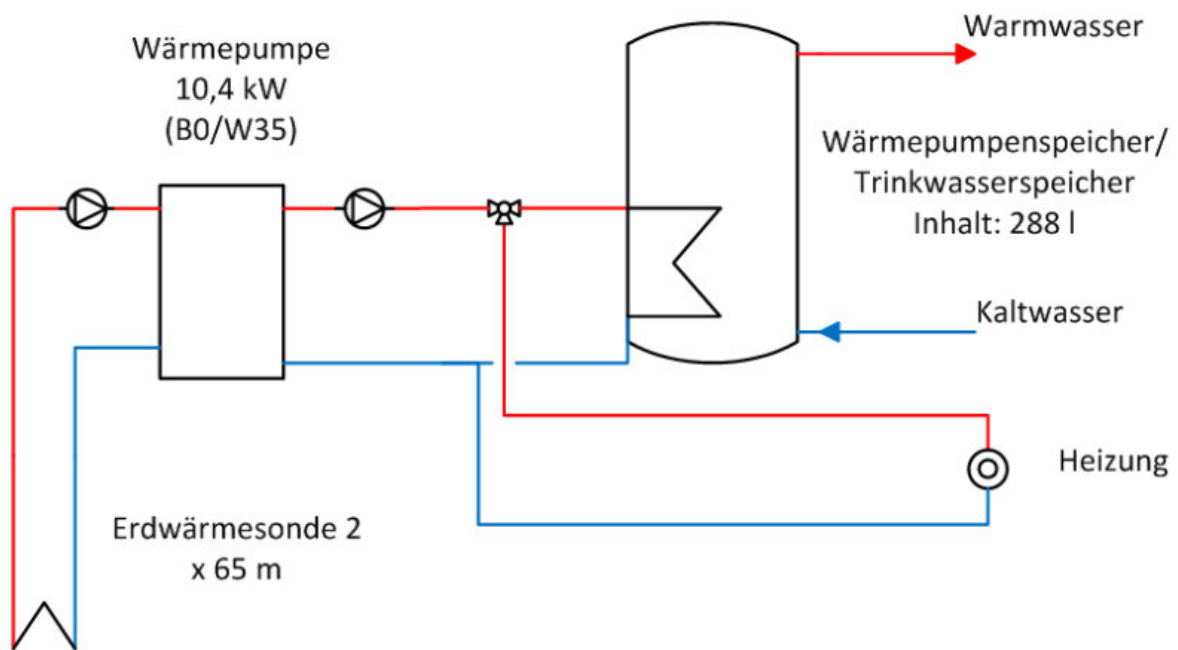


Abbildung 8: Schema Anlagenvariante "Wärmepumpe Stand-Alone" [19]

Bei der zweiten Variante, in der Arbeit „Wolf“ genannt, handelt es sich um eine Wärmepumpe in Kombination mit Solarthermie. Das Heizsystem wird mit einer Solarthermie aus 6 Kollektoren je 2 m^2 unterstützt, jedoch interagieren die Wärmepumpe und Solarthermie nicht miteinander. Der Solekreislauf kann je nach Bedarf entweder den oberen Teil für Warmwasser beladen oder den unteren für den Heizkreislauf. In der Abbildung 9 ist dieses System dargestellt.

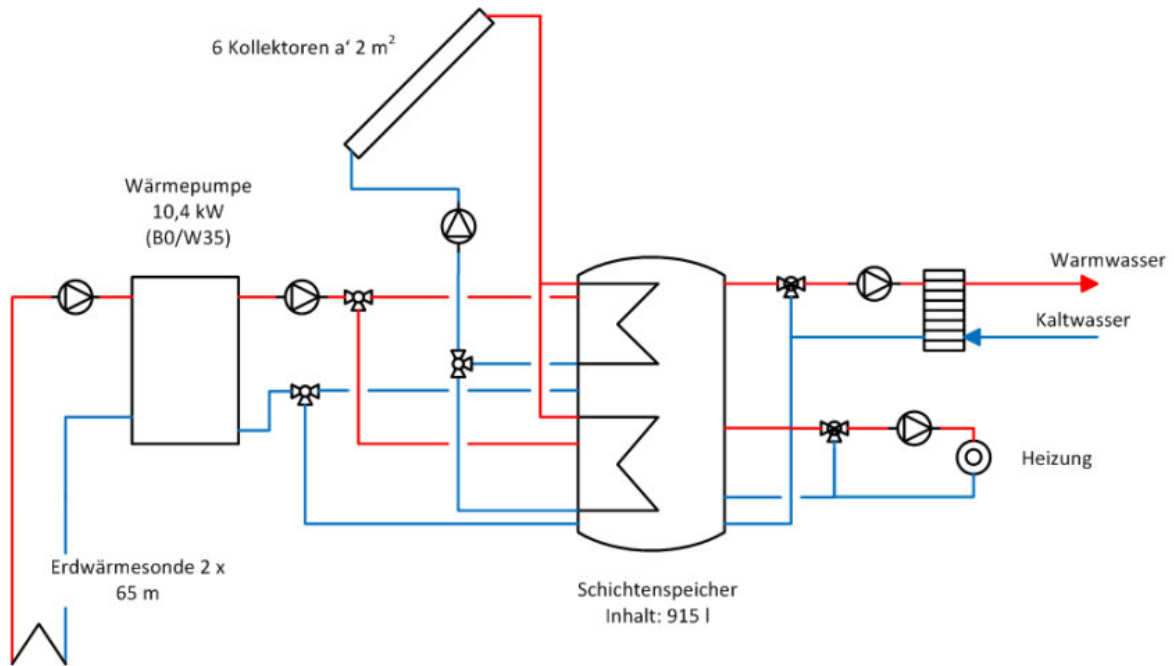


Abbildung 9: Schema Anlagenvariante "Wolf" [19]

Die dritte Anlagenvariante, in der Arbeit „Kombination“ genannt, ist eine Erweiterung der zweiten Variante mit einem Pufferspeicher. Dieser mit Sole gefüllte Pufferspeicher dient als Schnittstelle zwischen der Solaranlage und der Wärmepumpe. Ein 3-Wegventil kann den Solekreis von der Solaranlage und dem Pufferspeicher mit einer Regelung öffnen oder schließen, um der Sole-Wasser-Wärmepumpe eine alternative Wärmequelle zu ermöglichen. In der Studie wird betont, dass die Entscheidung, ob die Solarwärme direkt oder indirekt über die Wärmepumpe genutzt werden sollte, schwierig sei. Daher kann davon ausgegangen werden, dass Polysun möglicherweise nicht die beste oder optimale Lösung finden kann. [Plössing].

Es ist anzumerken, dass Plössing während der Simulation Schwierigkeiten hat, einen elektrischen Heizstab in der Wärmepumpe von Polysun zu integrieren. Im Falle einer Unterschreitung der Quelltemperatur oder wenn der Energiebedarf des Gebäudes nicht gedeckt wird, wird am Ende der Simulation eine Fehlermeldung generiert. In der Abbildung 10 diese Systemvariante schematisch dargestellt.

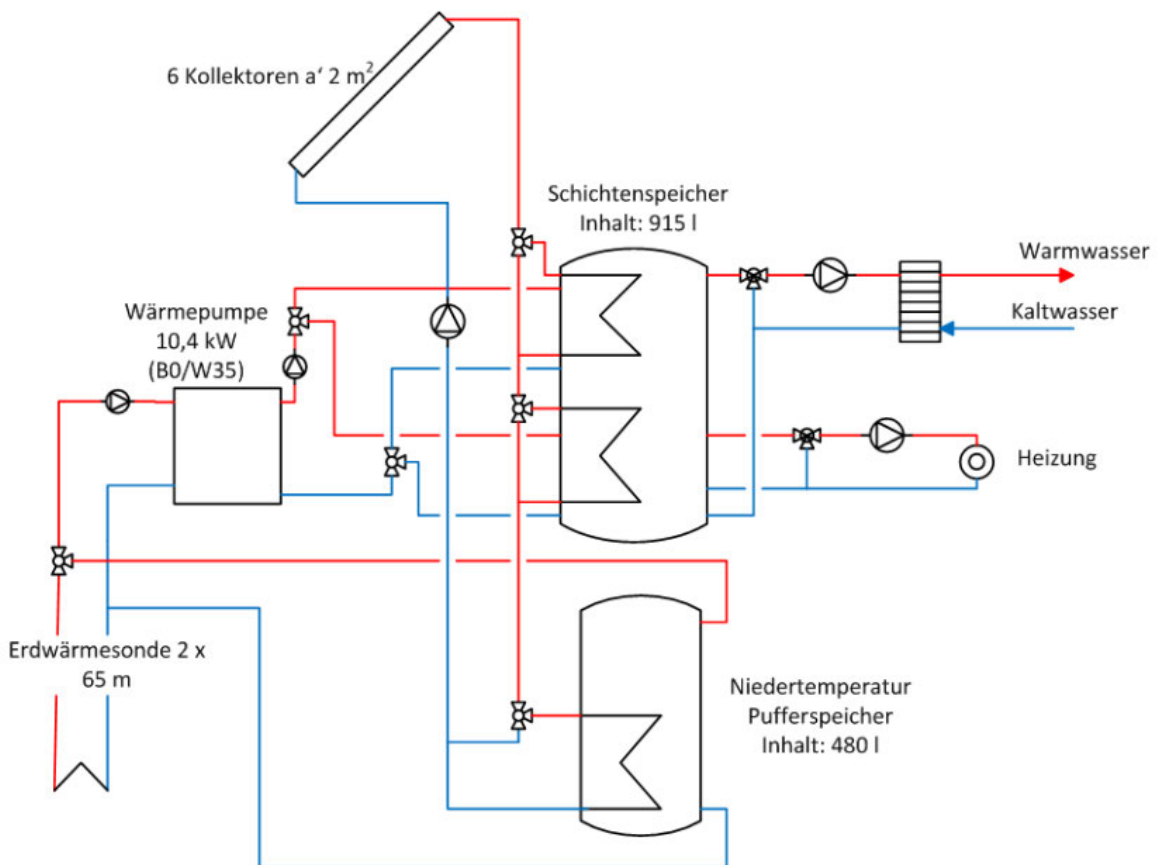


Abbildung 10: Hydraulikschemata Anlagenvariante Kombination [19]

Die Tabelle 1 zeigt eine Einsparung von 35 % beim elektrischen Verbrauch durch die Verwendung einer Solaranlage in der Variante Wolf im Vergleich zur Variante Stand-Alone. In der Variante Kombination, bei der ein Niedertemperaturspeicher als Schnittstelle zwischen der Solaranlage und der Wärmepumpe eingesetzt wird, verbessert sich die Einsparung um weitere 3,5 %. Die Kennzahl SPF (Seasonal Performance Factor) beschreibt die Effizienz des Systems oder der Wärmepumpe und wird definiert als das Verhältnis der verbrauchten Wärmeenergie (inklusive Verluste) zur aufgenommenen elektrischen Energie.

Tabelle 1: Ergebnisse der drei untersuchten Modelle in der Dipolarbeit J. Plössing [19]

	Einheit	System		
		Wärmepumpe Stand-Alone	Wolf	Kombination
Wärmebedarf inklusive Speicherverluste	kWh/a	11675	13463	13436
Kollektorertrag in BSP-SL-1000	kWh/a	-	5429	5509
Kollektorertrag gesamt	kWh/a	-	5429	6529
Wärmeverlust des Trinkwasser/Pufferspeicher	kWh/a	-399	-1765	-1799
Wärmeertrag der Wärmepumpe	kWh/a	11675	7678	7588
Entzugsenergie der Erdwärmesonde	kWh/a	8365	5526	4497
Elektrische Energieaufnahme der Wärmepumpe	kWh/a	3214	2078	1984
gesamte Elektrische Energieaufnahme	kWh/a	3368	2218	2141
Einsparung gegenüber System A	%	0	34	36
SPF der Wärmepumpe	-	3,63	3,70	3,82
SPF des Systems	-	3,47	6,07	6,28

Es ist zu erkennen, dass die Kombinationsvariante als Gesamtsystem einen SPF von 6,28 aufweist, im Vergleich zu 6,07 bei der Wolf-Variante und 3,47 bei der Stand-Alone-Variante. Dabei unterscheidet sich der SPF-Wert für die Wärmepumpe in der Kombinationsvariante mit 3,82 nur geringfügig von den Werten in den anderen beiden Varianten, nämlich 3,70 bei Wolf und 3,63 bei Stand-Alone. Aus diesem Grund ist ein Vergleich der Effizienz des Gesamtsystems entscheidend.

5 Vorstellung der untersuchten Systemvarianten

In dieser Arbeit werden drei Energieversorgungssysteme untersucht und miteinander verglichen. Das erste System nutzt aktuell Fernwärme und Stromnetz als Energiequelle und wird in dieser Arbeit FW genannt. Es werden zwei Varianten als Alternative zum Energieversorgungssystem des Hauptgebäudes untersucht.

Die erste Alternative ist eine Kombination von einer PV-Anlage mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe, die bivalent mit der derzeit bestehenden Fernwärmeversorgung funktioniert und in dieser Arbeit WP_PV genannt. Die Wärmepumpe versorgt den Wärmeverbraucher mit der Wärme und die PV-Anlage erzeugt Strom.

Die zweite Systemalternative ist eine Kombination von einer PVT-Anlage mit einer Sole-Wasser-Wärmepumpe und wird in dieser Arbeit WP_PVT genannt. Bei den photovoltaisch thermischen Modulen sollen die Hybridkollektoren als die Wärmequelle für die Wärmepumpe dienen und den Eigenstromverbrauch der Büroräume sowie der Wärmepumpe teilweise abdecken.

Eine Option zur Speicherung elektrischer Energie besteht in der Anwendung eines Batteriespeichers. Angesichts der Tatsache, dass die Räumlichkeiten des Gebäudes nur tagsüber besetzt sind und die Sonneneinstrahlung während dieser Zeit erfolgt, kann der erzeugte Strom in der Regel unmittelbar verbraucht werden. Der Einsatz eines elektrischen Speichers ist in der Regel für Privathäuser und Nutzer sinnvoll, die während der Abendstunden einen erhöhten Energiebedarf aufweisen, da die Erzeugung und der Bedarf zeitlich versetzt auftreten. Aufgrund dieser zeitlichen Übereinstimmung wird auf den Einsatz einer kostspieligen Batterie in dieser Arbeit verzichtet.

Ein entscheidendes Auswahlkriterium für die Systeme besteht darin, die ursprünglichen Systemkomponenten weitestgehend zu erhalten. Die Räumlichkeiten des Unternehmens werden mit Heizkörpern und Fernwärme beheizt. Das zu untersuchende System muss daher nahtlos in die bestehende Heizkörperinfrastruktur integrierbar sein.

Die Warmwasserversorgung erfolgt weiterhin über Durchlauferhitzer. Dies bietet den Vorteil, dass die Wärmepumpe nicht auf allzu hohe Temperaturen ausgelegt werden muss. Insbesondere in den Sommermonaten und während der Übergangszeiten wird das System entlastet. Wenn die Wärmepumpe für die Warmwasserversorgung eingesetzt wird, muss sie auch in den wärmeren Jahreszeiten stetig im Betrieb sein, um das Wasser auf die angeforderten Temperaturniveau zu bringen. Dies ist notwendig, um auf einer Seite den Warmwasserbedarf des Verbrauchers zu versorgen und auf der anderen Seite muss die Wassertemperatur im Warmwasserspeicher immer innerhalb eines bestimmten Temperaturbereichs (mindestens 60 °C beim Austritt des Trinkwassererwärmers) liegen [20], um Legionellenwachstum zu verhindern.

6 Modellierung und dynamische Simulation

In dieser Arbeit wird zum einen das aktuelle Energieversorgungssystem des Beispielsgebäude als auch die zwei Alternative Systeme in einem Programm dynamisch simuliert. Im Folgenden wird das Simulationstool und die damit durchgeführte Modelle beschrieben.

6.1 Beschreibung des verwendeten Tools

Für die Durchführung von den dynamischen Simulationen wird in dieser Arbeit das folgende Simulationstool verwendet:

6.1.1 Modelica

Modelica ist eine frei nutzbare, objektorientierte Modellierungssprache, die dazu dient, komplexe Systeme mit verschiedenen physikalischen Eigenschaften mathematisch zu beschreiben. Die herausragende Eigenschaft von Modelica liegt darin, dass es möglich ist, diverse physikalische Phänomene in einem einzigen Modell zu vereinen. Diese Eigenschaft erlaubt es, Systeme in ihrer Gesamtheit zu beschreiben, ohne separate Modelle für jede individuelle physikalische Domäne wie Mechanik, Elektrik, Hydraulik, Thermodynamik usw. erstellen zu müssen. Modelica-Modelle werden in der Regel als Differential-Algebraic Equations (DAEs) formuliert, was die Simulation und Analyse komplexer Systeme vereinfacht. Aufgrund der genannten Vorteile können detaillierte Simulationen und Analysen von komplexen Systemen in verschiedenen Branchen wie der Automobilindustrie, der Luft- und Raumfahrt, der Energieerzeugung durchgeführt werden [21].

Modelica hat drei wichtige Vorteile gegenüber anderen Modellierungssprachen:

1. Basis der Modellbildung auf algebraische Gleichungen
2. Multidomain-Modellierung
3. Mehrfachvererbung und Verwendung von Templates

Durch die Anwendung des Konnektor-Konzeptes ist eine Multidomain-Modellierung möglich. Ein Konnektor ist eine Klasse, die es erlaubt, einfachere Modelle miteinander zu verbinden und dadurch immer komplexere Modelle zu erzeugen. Die Verknüpfung von Konnektoren aus unterschiedlichen Teilmodellen führt zur Generierung eines Gleichungssystems. So werden die Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Komponenten erkannt und das Modell kann als ein ganzheitliches System untersucht werden [22].

6.1.2 Dymola

Das Simulationsprogramm "Dymola" basiert auf der Modelliersprache Modelica, wobei Modelle als Programmcode gespeichert und als Objekte betrachtet werden können. Die Erstellung komplexer Modelle erfolgt durch das Zusammenfügen von Submodellen per Drag-and-Drop, die in Modellbibliotheken verfügbar sind. Dymola stellt hierfür eine grafische Benutzeroberfläche zur Verfügung, die über Modellierungs- bzw. Simulationsblocks gesteuert werden kann. Diese Schnittstelle ermöglicht die grafische Ausgabe von Simulationsergebnissen. Dieses Programm kommt insbesondere im Automobilbau, der Luft- und Raumfahrttechnik sowie in der Robotik und Gebäudetechnik zum Einsatz [23].

6.1.3 HKE-Sim

Die ROM-Technik Modellierungsbibliothek HKE-Sim erweitert die Modelica Standardbibliothek und integriert zudem einige ihrer Grundbestandteile. Eine besondere Eigenschaft dieser Bibliothek besteht darin, dass die Simulationselemente gezielt für den Einsatz in umfangreichen Projekten der Technischen Gebäudeausrüstung konzipiert wurden. HKE-Sim ermöglicht die Durchführung von dynamischen Simulationen, wodurch Trägheits- und Materialeigenschaften in die Berechnungen einfließen können. Dies erlaubt äußerst präzise, umfassende und realitätsnahe Simulationen im Bereich der technischen Gebäudeausrüstung (TGA). Diese Simulationen sind besonders relevant, um eine optimale Planung für bevorstehende Bauprojekte zu gewährleisten. Das Grundprinzip von HKE-Sim basiert auf physikalischen Erhaltungsgleichungen, insbesondere der Massen- und Energieerhaltung. Es wird gewährleistet, dass der Verbrauch abgedeckt wird und alle Berechnungen darauf ausgerichtet sind.

Die Anwendung der Modellierung und Simulation mittels HKE-Sim ermöglicht eine umfassende Bandbreite von Freiheiten, erfordert jedoch eine gründliche und langwierige Einarbeitung und Erfahrung.

6.1.4 SunnyDesign

Inzwischen stehen zahlreiche Tools und Programme zur Verfügung, um die Simulation oder Planung einer PV-Anlage durchzuführen. Im vorliegenden Fall wird das Tool "Sunny Design" der Firma SMA eingesetzt. Dieses Programm ist für die Ermittlung des Potentials des

untersuchten Gebäudedachs verwendet, um herauszufinden, wie viele PV- oder PVT-Module auf dem Dach platziert werden können.

6.2 Simulierte Systeme

Um das effizienteste und nachhaltigste Energiesystem zu identifizieren, werden folgende Systeme modelliert:

- System 1: FW
- System 2: WP_PV
- System 3: WP_PVT

6.2.1 Modell des Referenzenergiesystems (FW):

„FW“ ist das Modell des Referenzsystems und repräsentiert das aktuelle konventionelle Energieversorgungssystem des untersuchten Beispielgebäudes. Dieses System besteht aus einem konventionellen Fernwärme-Heizsystem. Bei einer Fernwärmeversorgung dient Heißwasser als Wärmeträger. Die Fernwärme gelangt über ein unterirdisch verlegtes isoliertes Rohrleitungssystem direkt zum Verbraucher. Es wird eine Hausanschlussleitung von der Hauptleitung zum Gebäude gelegt, um den Endabnehmer anzubinden [24].

Der Verbraucher wird in mit Hilfe eines Moduls „consumer“ aus der Bibliothek HKE-SIM modelliert und mit einem Arbeitsfluid, hier kompressibles Wasser, und Vor- und Rücklauftemperatur parametrisiert. Mit Hilfe des Modells CombiTimeTable aus der Modelica-Bibliothek als eine Komponente wird das ermittelte Verbrauchsprofil eingelesen. Die Fernwärme ist so ausgelegt, um in jedem Zeitpunkt den Wärmebedarf abzudecken.

Das Heizsystem besteht aus einer Fernwärme-Übergabestation. Das kann mit Hilfe von einem Wärmetauscher aus HKE-SIM modelliert und anschließend parametrisiert werden. Der Wärmetauscher in der HKE-Sim verfügt über vier Anschlüsse. Zwei Anschlüsse bilden den Vorlauf und Rücklauf der Wärmequelle ab, die zwei anderen modellieren den Vorlauf und Rücklauf des Wärmeverbrauchers. Die Arbeitsmedien und Temperaturen der jeweiligen Vor- und Rückläufe können hier parametrisiert werden. Als Arbeitsfluid wird sowohl für die Quelle als auch für die Senke das gleiche Medium wie beim Verbraucher verwendet. Für die Fernwärmeanschluss wird eine elektrische Umwälzpumpe eingesetzt, die angemessen zu dem System parametrisiert ist. Abbildung 11 zeigt das Modell des Heizsystems aus einer Fernwärmeversorgung in HKE-Sim.

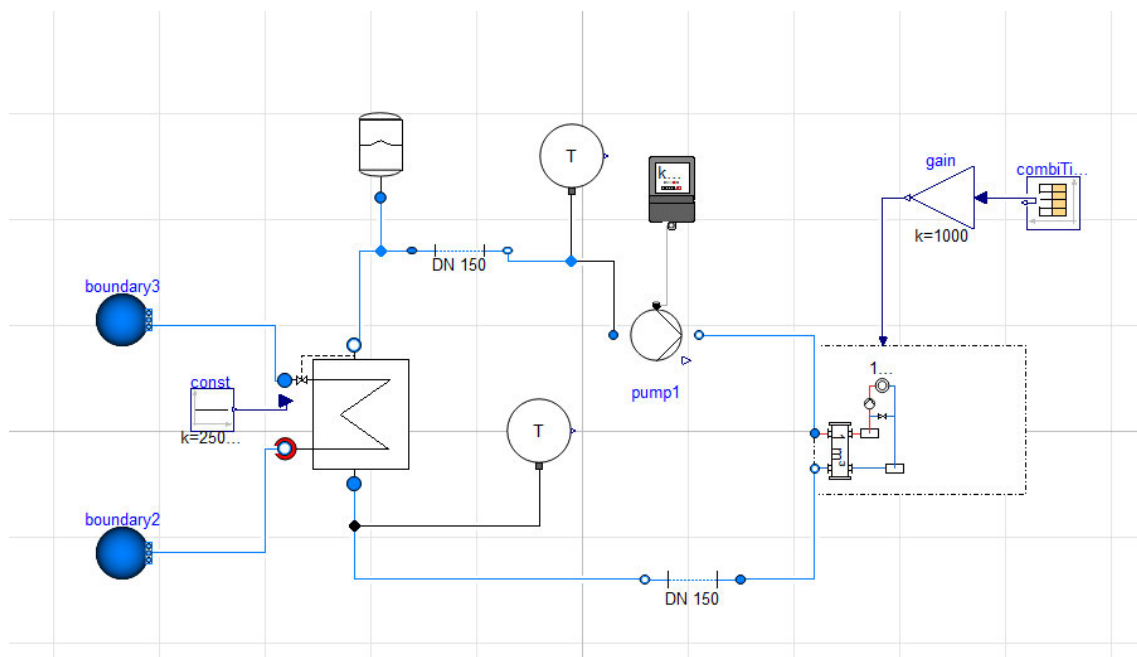


Abbildung 11: Modell des Heizsystems FW

Der Energiebedarf des Gebäudes wird im Referenzmodell vollständig durch das Stromnetz gedeckt. In der HKE-Sim-Modellierung wird der Stromverbraucher nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass der Stromverbrauch jederzeit ausreichend gedeckt ist und keine relevanten Informationen aus dem Modell extrahiert werden können.

6.2.2 Modell der bivalente Luft-Wasser-Wärmepumpe (WP_PV)

Die Wärmepumpe ist als ein fertig konfiguriertes Modell in der HKE-SIM-Bibliothek vorhanden, welches parametrisiert und um einige Komponenten ergänzt wird. Zwischen der Wärmepumpe und dem Verbraucher ist ein Pufferspeicher installiert. Die Wärmepumpe liefert warmes Wasser in den Speicher, dessen Temperaturniveau durch eine Regelung kontrolliert wird. Sobald die obere Temperaturgrenze des Pufferspeichers von 55 °C überschritten wird, erhält die Wärmepumpe ein Signal zum Ausschalten. Die Wärmepumpe wird erst wieder eingeschaltet, wenn die untere Temperatur des Speichers unter 45 °C fällt. Diese Maßnahme verhindert ein ständiges Ein- und Ausschalten der Wärmepumpe und steigert die Lebensdauer und schont die Wärmepumpe. Zugleich wird sichergestellt, dass der Verbraucher jederzeit mit der benötigten Wärme versorgt wird.

Das System ist so geregelt, dass die Wärmepumpe allein den Heizbedarf abdeckt, solange die Wärmeleistung 40 kW oder weniger beträgt. Bei einem Wärmebedarf über 40 kW wird die

Fernwärme zur Unterstützung hinzugezogen. Dies dient dazu, eine Überdimensionierung der Wärmepumpe zu vermeiden. Die genannte Wärmeleistung entspricht einer Außentemperatur von 7,5°C. Unterhalb dieser Temperaturgrenze arbeiten die Wärmepumpe und die Fernwärme gleichzeitig, d.h. die Wärmepumpe ist im Betrieb und den Rest wird durch die Fernwärme abgedeckt. Durch erste Voruntersuchungen hat sich eine Luft-Wasser-Wärmepumpe mit einer Leistung von 100 kW und einem COP von 4,6 als notwendig erwiesen.

Abbildung 12 zeigt das Schema des WP_PV-Modells zu erkennen.

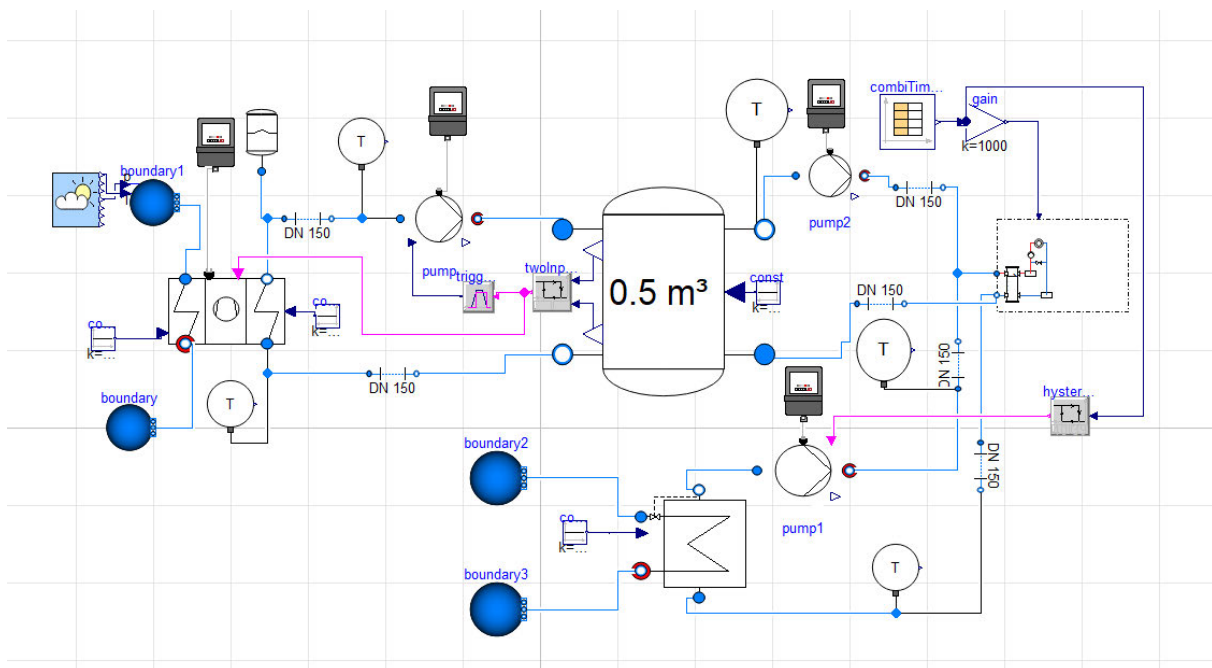


Abbildung 12: Modell des Heizsystem WP_PV

6.2.3 Model der solarunterstützten bivalenten Sole-Wasser-Wärmepumpe (WP_PVT)

Der Unterschied zwischen WP_PVT und WP_PV liegt zum einen darin, dass die PV-Module durch PVT-Module ersetzt werden. Ein weiterer Unterschied ist der Kollektor als Wärmequelle für die Wärmepumpe. Das frostgeschützte Wasser-Glykol-Gemisch mit 40% Propylenglykol, fließt durch die PVT-Module und nutzt die Sonnenstrahlung und erwärmt sich. Dies ist die Wärmequelle für die Sole-Wasser-Wärmepumpe.

Das Modell des PVT-Systems verwendet die Außentemperatur, Windgeschwindigkeit sowie die diffuse und direkte solare Einstrahlung. Das durch die Sonneneinstrahlung erwärmte Medium wird anschließend mithilfe einer Umwälzpumpe in den Verdampfer der Wärmepumpe geleitet, gibt seine Wärme an das Wasser im Wärmetauscher ab. Das erwärmte Wasser wird

dann zum Pufferspeicher weitergeleitet. Die Wärmepumpe erhält ein Ausschaltesignal bei einer Zelltemperatur (die Temperatur im PVT-Modul) von 265 °K (-8,15 °C).

Abbildung 13 stellt das Modell für WP_PVT-Modell dar.

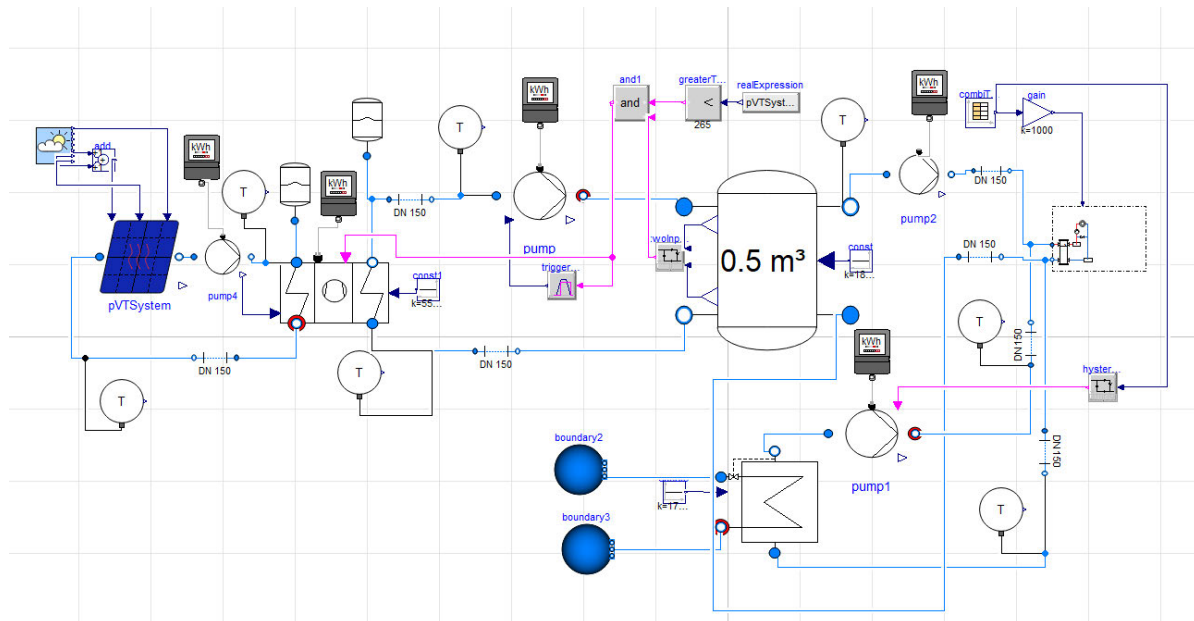


Abbildung 13: Model des WP_PVT

Bei WP_PVT wird eine Sole-Wasser-Wärmepumpe mit einer Leistung von 90 kW benötigt. Der COP wird ebenfalls auf 4,6 festgelegt. Alle anderen Parameter und Komponenten bleiben identisch mit dem vorherigen System.

Die PVT-Module dienen sowohl als Wärmequelle für die Wärmepumpe als auch als Stromerzeuger. Im Parametrisierungsfenster des PVT-Systems in HKE-Sim können verschiedene Parameter wie die Anzahl der Module, der Neigungswinkel, der Azimut, die elektrische Peak Leistung und weitere Parameter eingestellt werden. Idealerweise sollten die Module in Südrichtung platziert werden, um den höchsten Ertrag zu erzielen. Aufgrund der Orientierung des Gebäudes, das um 19 ° von der Südrichtung in Richtung Osten geneigt ist, werden die Module jedoch parallel zu den Gebäuderändern angeordnet, um den verfügbaren Platz optimal zu nutzen und eine höhere Moduldichte zu ermöglichen.

Um vor allem im Winter einen größeren Ertrag zu erzielen, sollen die Module in einem Winkel von 20° bis 60° aufgestellt werden. Größere Neigungswinkel helfen, die Sonnenstrahlung im Winter, wenn die Sonne tiefer steht, nahezu senkrecht auf die Modulfläche treffen zu lassen. Allerdings muss bei größeren Winkeln ein größerer Abstand zwischen den Modulen auf der nächsten Reihe angebracht werden, um eine gegenseitige Verschattung zu vermeiden. Es wird daher angestrebt, einen Mindestabstand von etwa dem Dreifachen der Höhe der

senkrechten Kante des Moduls einzuhalten. Hier wird ein Kompromiss eingegangen, damit möglichst viele Module auf der Fläche belegt werden und gleichzeitig die Verschattung möglichst gering wird. Die Module werden in 30° Aufstellwinkel hingestellt und mit 50 cm Abstand zur nächsten Reihe platziert.

Die einzelnen Module haben Abmaße von 1,722 m · 1,134 m, was einer Fläche von 1,95 m² entspricht. Eine elektrische Leistung von 425 Watt Peak und eine thermische Leistung von 975 Watt Peak sind die weiteren Eigenschaften dieser PVT-Module. Jedes Modul besteht aus 108 monokristallinen Halbzellen.

In der Abbildung 14 ist ein vergleichbar identisches PVT-Modul zu sehen.

PVT Solar Hybridkollektor BlackDiamond BSM-425

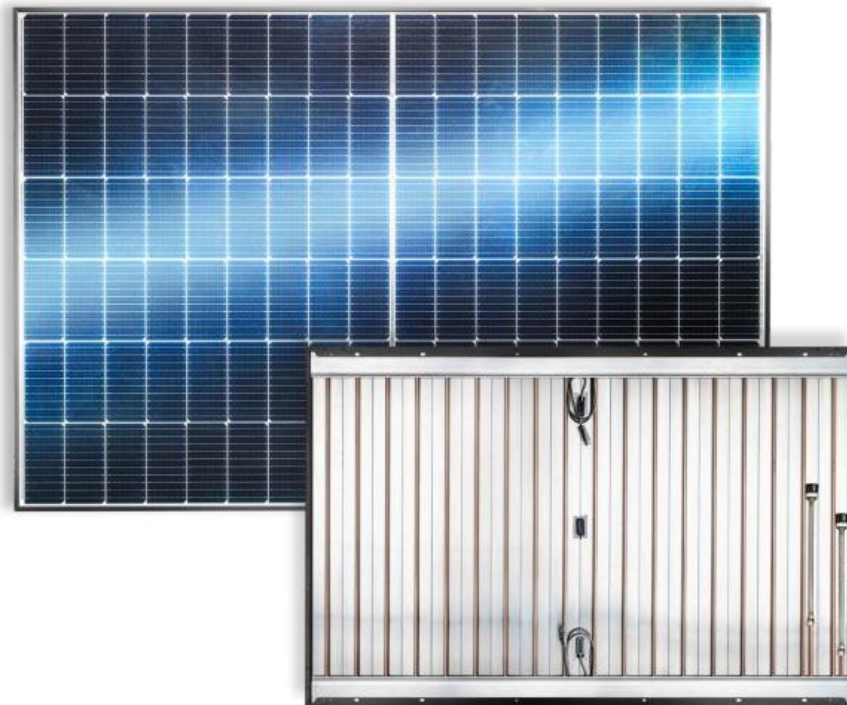


Abbildung 14_ PVT-Kollektoren [25]

Bei WP_PVT-System wird die Leistung und die elektrische Energie simuliert. Um die Komplexität des Modells zu reduzieren, wird das Ergebnis separat mit dem elektrischen Verbraucher untersucht, indem das Profil der Stromerzeugung und des Stromverbrauchs miteinander verglichen werden.

Zur Bestimmung der Kapazität der verfügbaren Fläche für die Auslegung der PVT-Module wird im Sunny Design ein Modell des Gebäudes mit identischen Abmessungen wie das Gebäude A erstellt und mit vergleichbaren PV-Modulen belegt. Diese Module weisen dieselben Abmessungen und elektrische Leistung auf wie die in HKE-Sim verwendeten PVT-Module.

6.3 Randbedingungen

Um verlässliche Ergebnisse zu erzielen, ist es entscheidend, dass die Randbedingungen möglichst realitätsnah gestaltet sind und für alle Systemvarianten identisch gelten. Eine der essenziellen Randbedingungen ist der gleiche Verbrauchsprofil, sowohl Stromverbrauch als auch Wärmeverbrauch, die in dieser Arbeit bei den drei Modellen gleich festgelegt sind.

Um die Effizienz der Wärmepumpe zu steigern, wird darauf geachtet, dass zu hohe Vorlauftemperaturen vermieden werden. In Bezug auf COP-Definition gilt, dass niedrigere Vorlauftemperaturen die Effizienz erhöhen. Wenn die Vorlauftemperatur auf 35 °C eingestellt wird, arbeitet die Wärmepumpe optimal. Diese Vorlauftemperatur ist beispielsweise in Verbindung mit einer Fußbodenheizung in einem Neubau umsetzbar. Vorlauftemperaturen für Heizkörper können je nach Heizsystem und Gebäudedämmung in der Regel in einer Bandbreite von 45 °C bis 90 °C liegen. Da die Gebäude komplett saniert wurden, haben diese einen modernen Wärmedämmstandard. Vorlauftemperaturen von 45 °C bis 55 °C sind in jedem Fall ausreichend. Es wird daher für den Auslegungsfall der Heizkörper eine Vorlauftemperatur von 55 °C und Rücklauftemperatur 45 °C gewählt.

Der verwendete Speicher stellt dem Verbraucher die gespeicherte Wärme mithilfe einer Umwälzpumpe zur Verfügung. Der Pufferspeicher hat ein Volumen von 0,5 m³ und ist mit einer 15 cm dicken Isolierung versehen, um die Wärmeverluste über die Mantelfläche zu minimieren.

In allen Systemvarianten werden Rohre gleicher Spezifikation mit einer Rohrweite DN150 verwendet. Diese Dimensionierung ergibt sich für den Gesamtvolumenstrom der Heizungsanlage als sinnvoll. Das Material der Rohrwand besteht aus Stahl und ist mit einer Isolierung aus Polyurethan-Hartschaum versehen, wobei die Dicke der Isolierung gleich dem Durchmesser der Rohre ist.

Für einen genaueren Vergleich der Systeme werden die Heizsysteme unter der Bedingung ausgelegt, dass das Verhältnis der Deckungsanteile der Wärmepumpe zu Fernwärme bei etwa 80 % zu 20 % liegt. Aus diesem Grund wird vermieden, dass die Wärmepumpe eine sehr große Leistung hat. Die Spitzenleistung der Wärmeversorger ist 150 kW, siehe 2.1.1 ($H_{\max} = 150 \text{ kW}$).

Die Modelle werden so aufgebaut, dass der Verbraucher die Wärmemenge bekommt, die er braucht, damit die Ergebnisse vergleichbar sind.

Abbildung 15 zeigt die direkte und diffuse Solarstrahlung des Testreferenzjahres im Jahresverlauf. Die direkte Sonnenstrahlung im Sommer ist deutlich stärker als im Winter, bis maximal etwa 800 W/m².

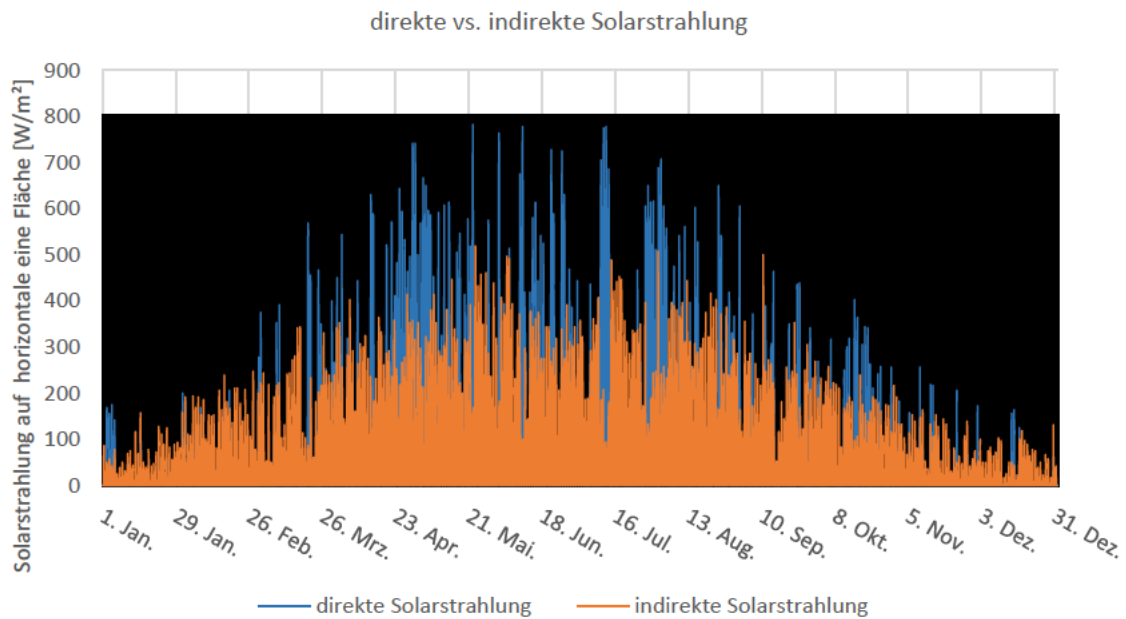


Abbildung 15: direkte und diffuse Solarstrahlung

7 Ergebnisse und Auswertung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der simulierten Modelle dargestellt. In der Abbildung 16 kann nachvollzogen werden, wann die Wärmepumpe in Betrieb ist und wann die Fernwärme den restlichen Bedarf deckt.

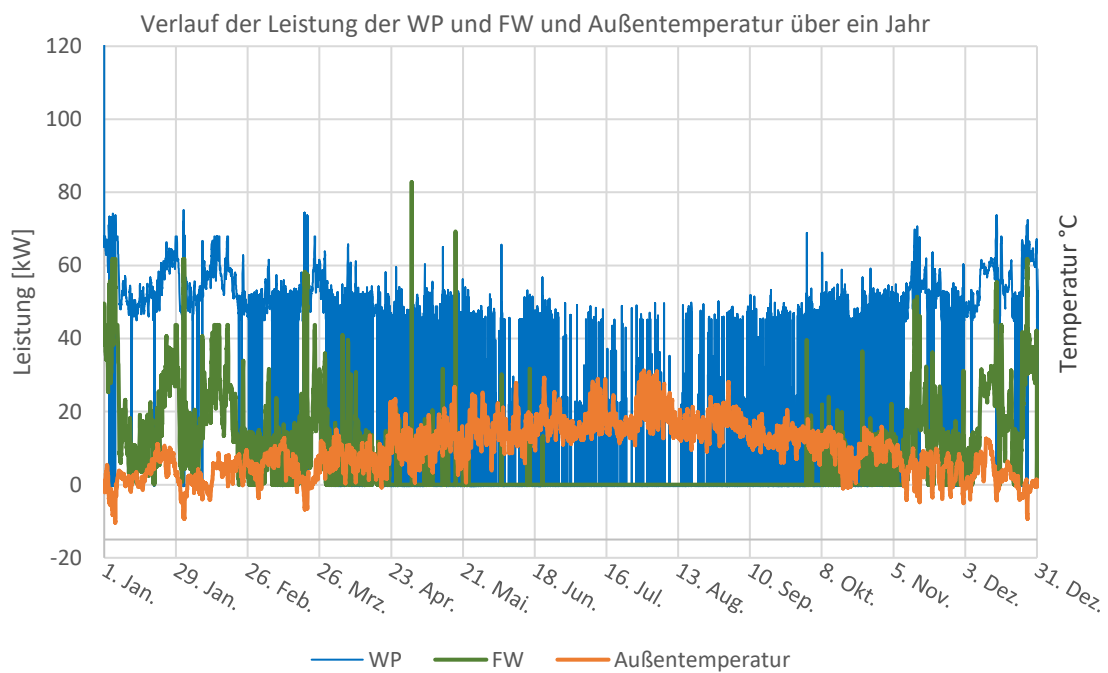


Abbildung 16: Betrieb der WP und FW über ein Jahr

Abbildung 17 zeigt den Betrieb der Wärmepumpe und Fernwärme in der ersten Woche im Januar als repräsentativer Zeitraum für Winter.

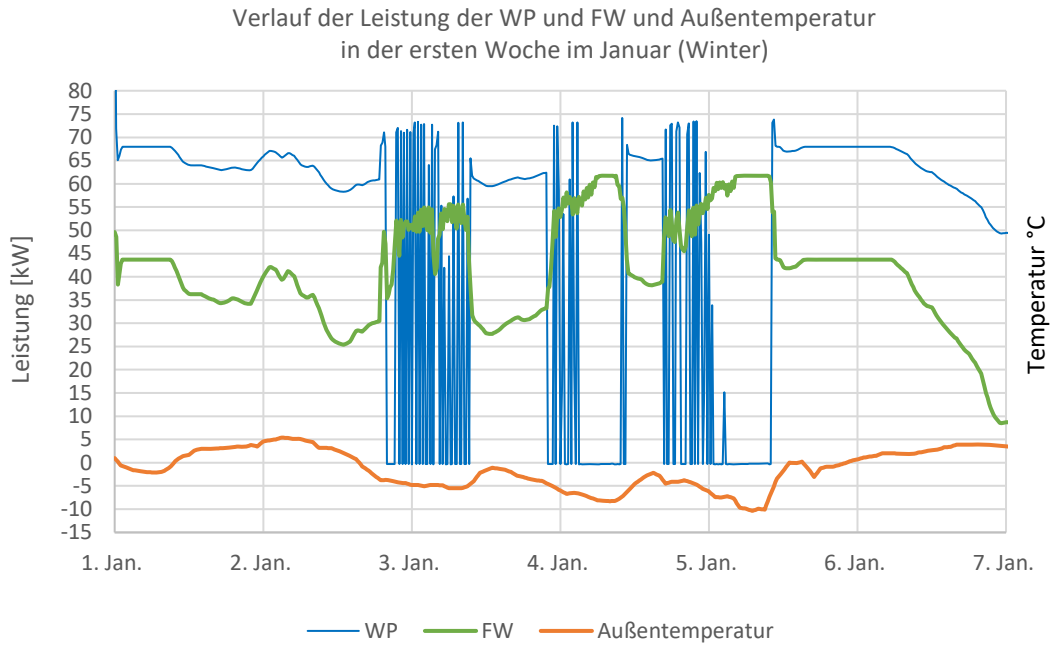


Abbildung 17: Verlauf der Leistung der WP und FW und Außentemperatur in einer Woche im Winter

Abbildung 18 stellt den Betrieb der Wärmepumpe und Fernwärme in der ersten Woche im Juli als repräsentativer Zeitraum für Sommer.

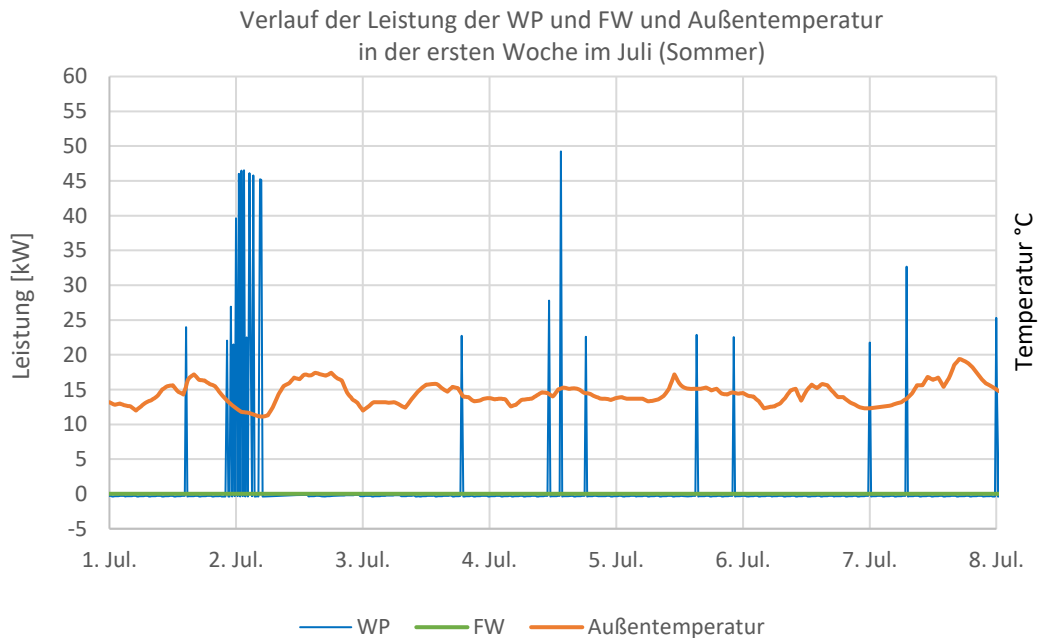


Abbildung 18: Verlauf der Leistung der WP und FW und Außentemperatur in einer Woche im Sommer

Anhand der Abbildungen ist es zu erkennen, dass die Wärmepumpe im Sommer und in den Übergangszeiten hauptsächlich allein im Betrieb ist, während in den kälteren Jahreszeiten Wärmepumpe und Fernwärme in der Regel gleichzeitig im Betrieb sind und die Fernwärme den Rest des Wärmebedarfs abdeckt.

Laut dem Modell in SunnyDesign kann auf dem Dach des A-Gebäudes 285 Module platziert werden. Abbildung 19 zeigt das erstellte Modell in SunnyDesign mit den vergleichbaren Modulen.

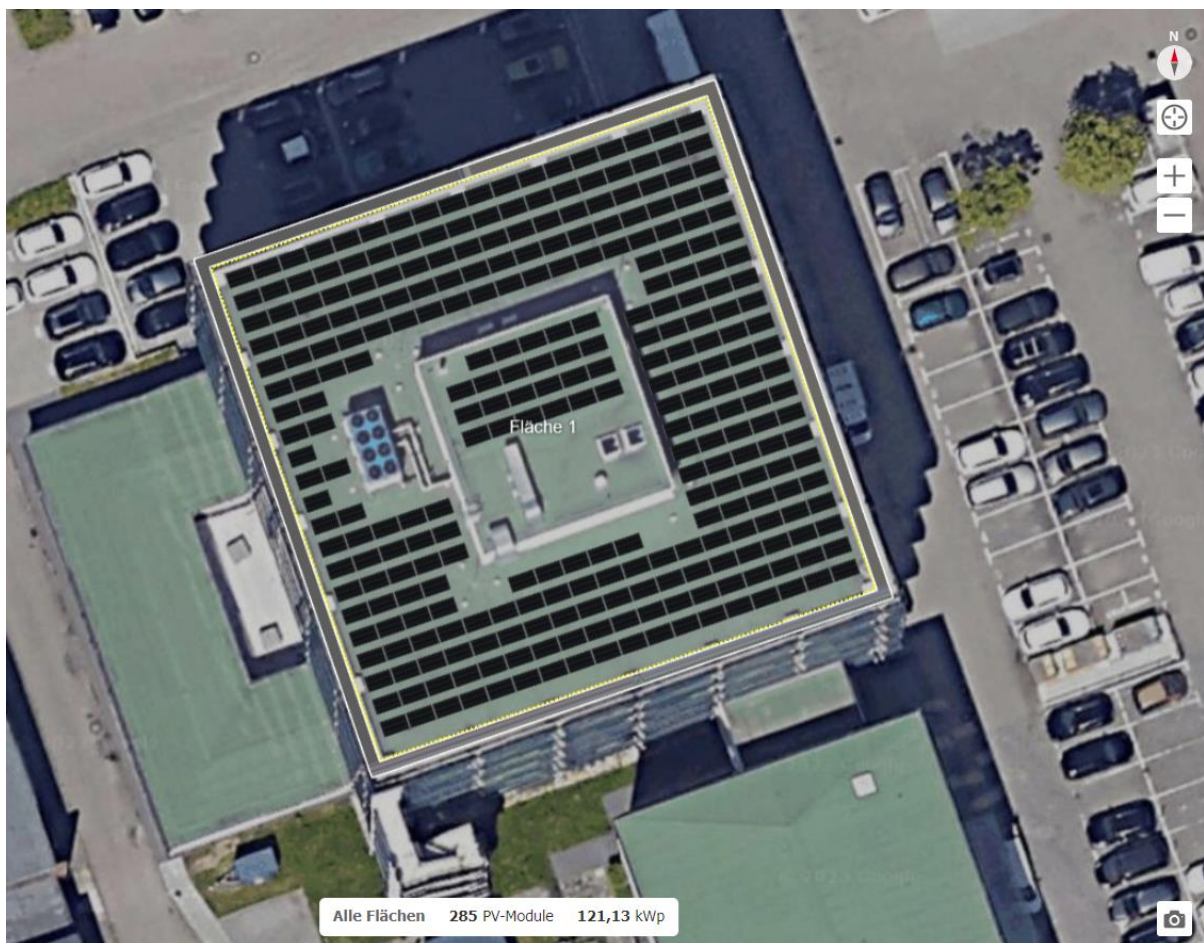


Abbildung 19: PV-Anlage auf dem Dach des A-Gebäudes (erstellt in SunnyDesign)

Abbildung 20 stellt die Stromerzeugung der Module über ein Jahr dar. Es wird deutlich, dass die Module im Winter über deutlich weniger Ertrag verfügen und im Sommer, bei Vorhandensein direkter Strahlung bis maximal etwa 80 kW elektrische Leistung erzeugen. Die Nennleistung von $285 \text{ Stück} \cdot 0,425 \text{ kW} = 121,125 \text{ kW}$ wird nicht erreicht. Dies ist zu erwarten, da die Nennleistung der PV- bzw. PVT-Module unter speziellen Testbedingungen gemessen wird. Diese Testbedingungen umfassen eine Umgebungstemperatur von 25 °C , eine Bestrahlungsstärke von 1000 W/m^2 sowie eine Luftmasse AM von 1,5 (STC: Standard Test

Conditions). Die Peak-Leistung von 81 kW entspricht einer durchschnittlichen Leistung von 284 Watt pro Modul.

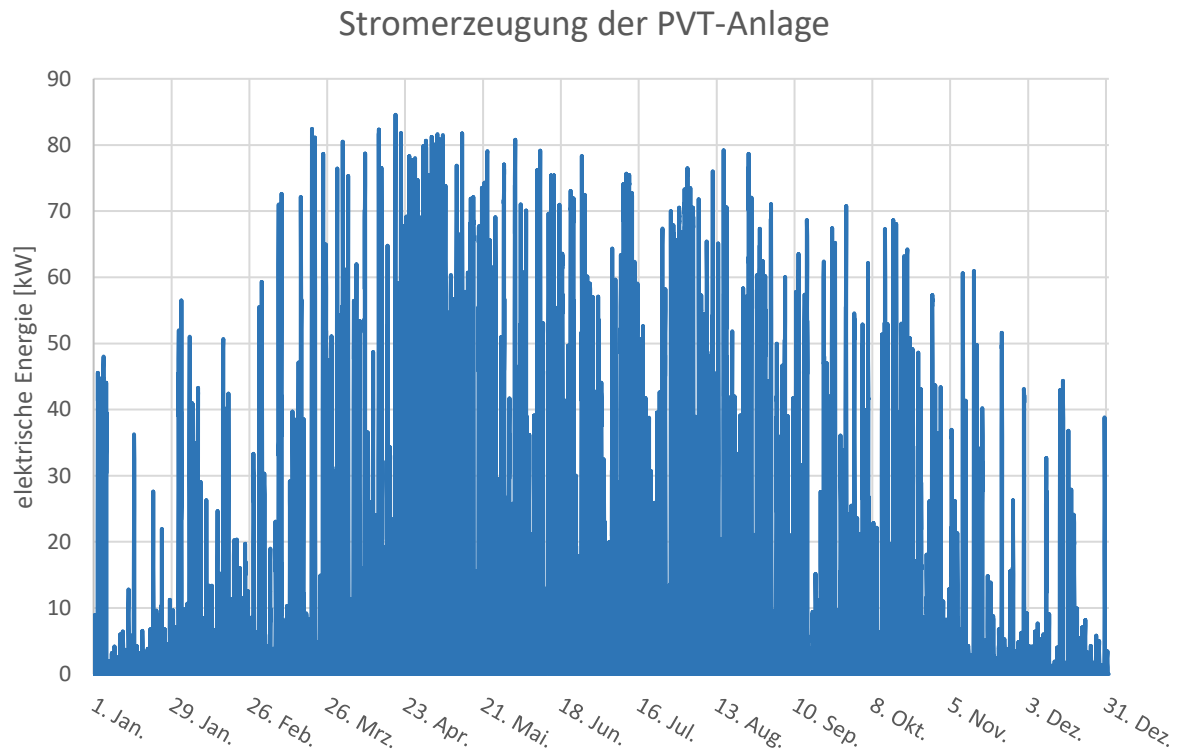


Abbildung 20: Stromerzeugung der PVT-Anlage

7.1.1 Stromverbrauch, Stromerzeugung:

Die Stromproduktion durch die PV- und PVT-Anlage im untersuchten Jahr beträgt insgesamt 86.536 kWh. Um das Verhältnis des elektrischen Teils des Energieversorgungssystems besser zu untersuchen und den Deckungsanteil durch die PV-Anlage genauer zu analysieren, werden die simulierten Werte, mit dem im 15-minütigen Takt aufgenommenen Verbrauchsprofil verglichen.

Abbildung 21 zeigt den Verlauf des Stromlast der Beispielsgebäude bei FW (ohne Wärmepumpe) und WP_PV (mit der Wärmepumpe) in einem Jahr.

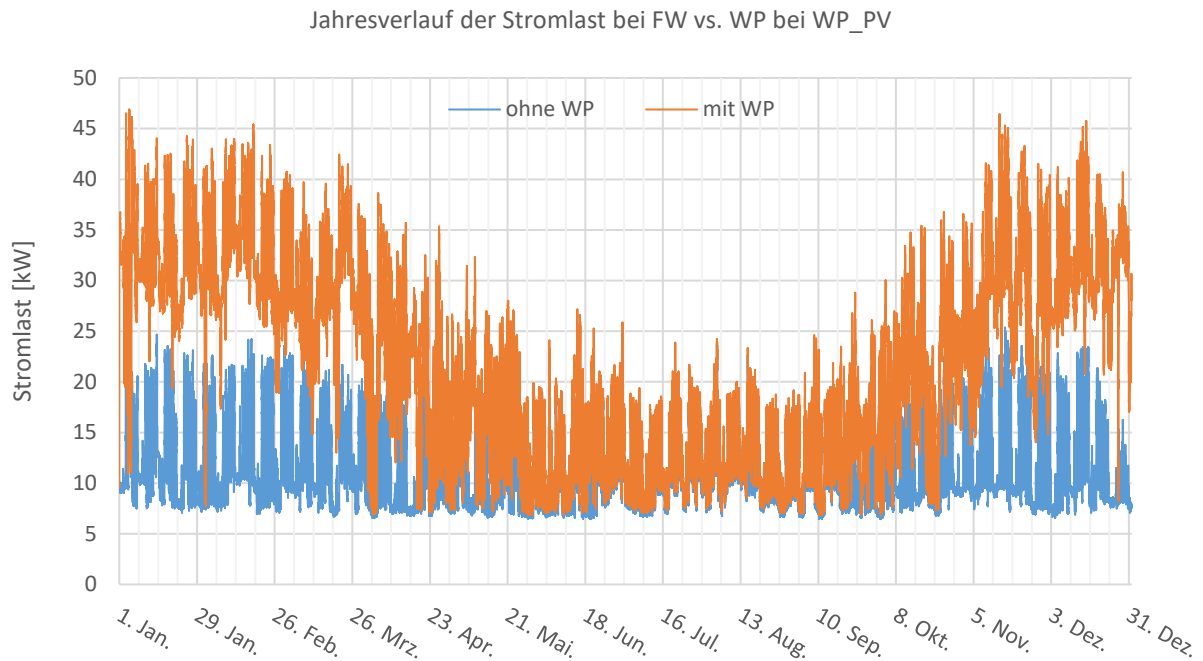


Abbildung 21: Vergleich der Stromlast FW vs. WP_PV

Für die 100 kW große Wärmepumpe und die Umwälzpumpen bei WP_PV wird hier eine elektrische Energie von 89.124 kWh/a benötigt. Der gesamte Stromverbrauch des Gebäudes zusammen mit dem Verbrauch des Heizsystems 186.832 kWh/a. Aufgrund der Zeitverschiebung zwischen Stromerzeugung und Stromverbrauchs kann der erzeugte Strom durch die PV-Anlage nicht vollständig verbraucht werden, und ein Teil davon wird ins Stromnetz eingespeist. Dies ist insbesondere im Sommer der Fall, wo die PV- bzw. PVT-Anlage mehr Strom erzeugt als der Verbrauch. Der benötigte Strom aus dem Netz beträgt 142462 kWh/a, 42167 kWh/a werden über das Jahr ins Netz eingespeist. Der Eigenverbrauch von 44369 kWh/a entspricht der Deckungsanteil von 23,75 %.

Bei WP_PVT sieht es wie folgt aus: Der Stromverbrauch des WP_PVT beträgt 89.775 kWh/a. Der Gesamtstromverbrauch im Jahr liegt bei 187.482 kWh/a. Der leicht erhöhte Verbrauch im Vergleich zu WP_PV ist auf die zusätzliche Pumpe zwischen der PVT-Anlage und der Wärmepumpe zurückzuführen. Aus dem Stromnetz müssen 143.163 kWh/a Strom bezogen werden.

Der Überschuss an Stromerzeugung von 42217 kWh/a muss ins Netz eingespeist werden. Der Eigenverbrauch von 44319 kWh/a bei WP_PVT entspricht einem Deckungsanteil von 22,48 % wird durch die PVT-Anlage bereitgestellt.

Zur Veranschaulichung des Systemverhaltens wird der Verlauf der Stromerzeugung und des

Stromverbrauchs für einen Monat im Winter und einen Monat im Sommer dargestellt. Dies wird bei der dritten Variante gezeigt, und aufgrund der Ähnlichkeit wird auf die Darstellung der zweiten Variante verzichtet. Abbildung 22 zeigt der momentane Stromverbrauch und Stromerzeugung in der ersten Woche vom Januar, repräsentativ für den Winter.

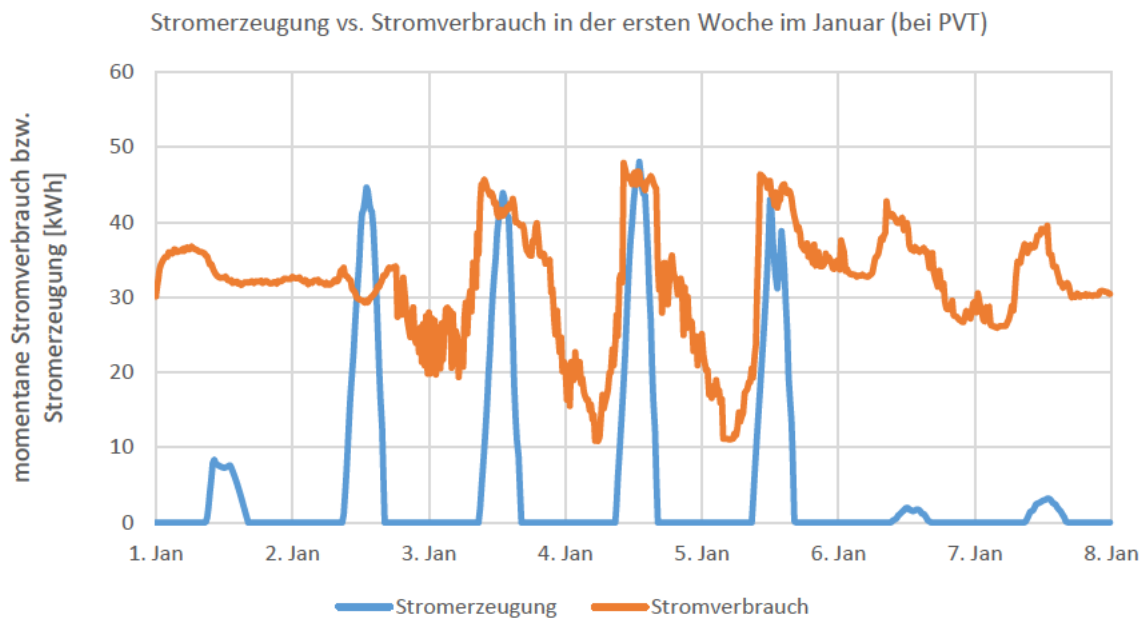


Abbildung 22: Stromproduktion gegen Stromverbrauch bei der PVT-Variante in der ersten Woche im Januar

Aus diesem Diagramm lässt sich erkennen, dass im Januar der Stromverbrauch deutlich dominanter ist als die sehr geringe Stromproduktion der PVT-Anlage.

Im Winter muss deutlich mehr Strom aus dem Netz bezogen werden. Dies liegt daran, dass zum einen in den dunklen Jahreszeiten mehr Strom zum Heizen benötigt wird. Der Heizbedarf muss abgedeckt werden und die Wärmepumpe ist öfters im Betrieb. Die Wärmepumpe verbraucht mit in kälteren Tagen mehr, denn laut der Definition von COP wird mit der kälter werdenden Außentemperatur mehr Energie für den Betrieb einer Wärmepumpe benötigt. Zum anderen ist die Sonnenstrahlung in deutlich kürzerer Zeit vorhanden. Daher kann die PV-Anlage dementsprechend weniger Strom erzeugen. Ein weiterer Grund ist, dass im Winter für eine längere Zeit Beleuchtung benötigt wird.

Abbildung 23 zeigt der momentane Stromverbrauch und Stromerzeugung in der ersten Woche vom Juli, repräsentativ für den Sommer. Anhand dieses Diagramms ist zu erkennen, dass im Sommer das Verhältnis des Stromverbrauchs zur Stromerzeugung anders als im Januar zugunsten der Stromerzeugung der PVT-Anlage ist.

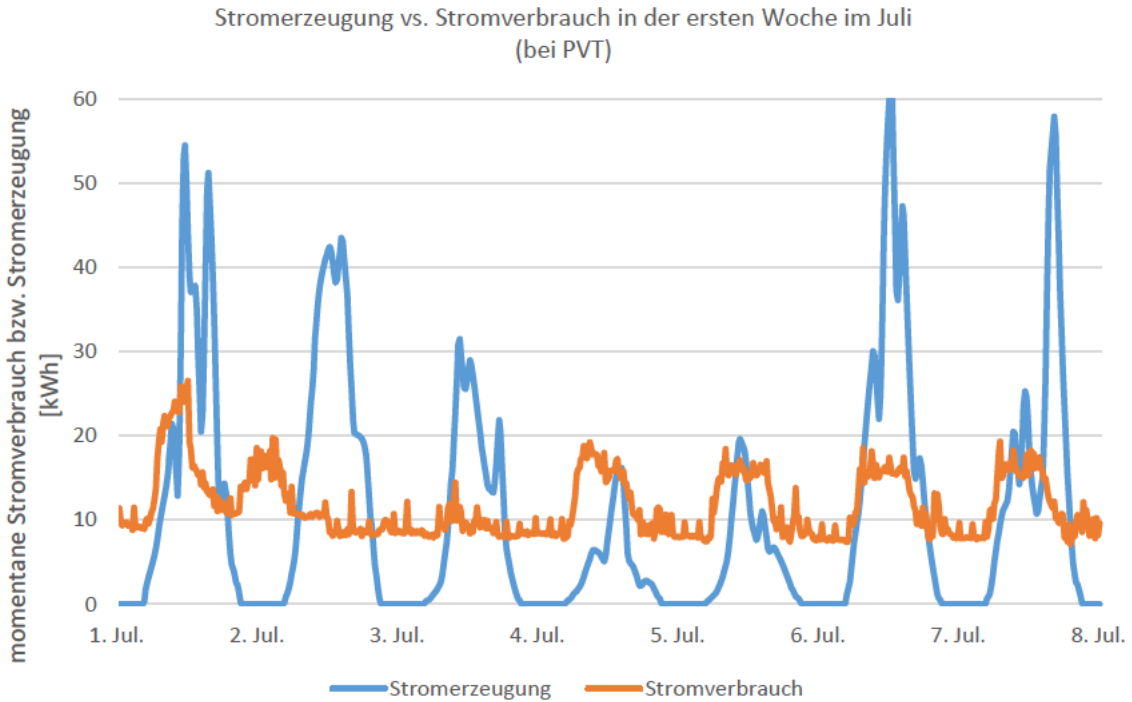


Abbildung 23: Stromproduktion gegen Stromverbrauch bei der WP_PVT in der ersten Woche im Juli

In der Tabelle 2 sind zum besseren Vergleich die Eckdaten des elektrischen Verbrauchs und Stromerzeugung der drei Modelle dargestellt.

Tabelle 2: Vergleich der Ergebnisse im Bezug auf Strom bei den drei Varianten

Systemvariante	FW	WP_PV	WP_PVT
Stromverbrauch des Heizsystems [kWh]	5867	89124	89775
Stromproduktion [kWh]	-	86536	86536
Eigenverbrauch [kWh]	-	44369	44319
Deckungsgrad des gesamten Stromverbrauchs [%]	-	23,749	22,483
Stromeinspeisung [kWh]	-	42167	42217
summe des Stromverbrauchs des gesamten Systems [kWh]	97707	186832	187482
Strombezug aus dem Stromnetz [kWh]	97707	142462	143163
Gesamtstromverbrauch abzüglich der Stromproduktion [kWh]	97707	100295	100946

7.1.2 Jahresarbeitszahl

Für die Berechnung der JAZ der Wärmepumpensystemen wird Gleichung (4) verwendet, siehe 3.1.

$$\text{Für WP_PV} \quad \frac{\int_1^{365} Q_{\text{con}} [\text{kWh}]}{W_{\text{el.}}[\text{kWh}]} = \frac{239281 [\text{kWh}]}{89124 [\text{kWh}]} = 2,68$$

$$\text{Und WP_PVT} \quad \frac{\int_1^{365} Q_{\text{con}} [\text{kWh}]}{W_{\text{el.}}[\text{kWh}]} = \frac{236509 [\text{kWh}]}{89775 [\text{kWh}]} = 2,63$$

Beim Stromverbrauch wird der Verbrauch der Wärmepumpe sowie der dafür benötigten Umwälzpumpen berücksichtigt, und somit der gesamte elektrische Verbrauch des Heizsystems.

Bei der Simulation des ersten Modells, des Heizsystems mit Fernwärmeversorgung, werden 299.452 kWh/a Wärmeenergie zur Verfügung gestellt. Die Abweichung von 0,18 % vom Wärmebedarf hat hier keine praktische Bedeutung, da davon ausgegangen wird, dass die Fernwärme in ausreichendem Maße verfügbar ist, um den Wärmebedarf zu jeder Zeit zu decken. Zusätzlich werden 5867 kWh elektrische Energie für die Umwälzpumpe benötigt. In der Simulation von WP_PV, beträgt die verfügbare Wärmeenergie 239.281 kWh/a. Auf diese Weise werden etwa 80% des Wärmebedarfs durch die 90 kW große Wärmepumpe gedeckt, während die verbleibenden 60.718 kWh/a durch Fernwärme bereitgestellt werden. Bei WP_PVT beträgt die verfügbare Wärmeenergie 297.423 kWh/a. Hier werden ebenso etwa 80 % des Wärmebedarfs durch die 90 kW große Wärmepumpe gedeckt, während die verbleibenden 60.914 kWh/a durch die Fernwärme bereitgestellt werden.

7.1.3 Bilanz des CO₂-Ausstoßes

Ein entscheidender Wert für die Beurteilung der Nachhaltigkeit der Energiesysteme ist der CO₂-Ausstoß. Bei der Fernwärme variiert der CO₂-Ausstoß je nach Produktionsmethode erheblich. In dieser Arbeit wird eine beispielhafte Betrachtung die mittleren Werte für Deutschland angesetzt, damit die Ergebnisse besser auf den anderen Fällen übertragbar sind. Im Durchschnitt wird für die Nutzung der Wärmeenergie durch Fernwärme 198 g/kWh CO₂ produziert [26]. Somit beträgt die CO₂-Emission für den jährlichen Wärmeverbrauch durch die Fernwärme 59.400 Kg/kWh.a.

Für den Stromverbrauch wird für jede Kilowattstunde 434 Gramm CO₂-Ausstoß angenommen [27].

Demnach ist die CO₂-Emission durch den Stromverbrauch für das Referenzgebäude im Jahr 42.405 Kg/kWh.a CO₂. Insgesamt ist ein CO₂-Ausstoß von 101.805 kg/a bzw. 101,8 Tonnen

in dem untersuchten Jahr für das gesamte Energieversorgungssystem des Gebäudes zu rechnen.

Bei WP_PV steigt der Gesamtstromverbrauch durch den Betrieb der Wärmepumpe auf 186.832 kWh/a. In diesem System erzeugt die PV-Anlage jedoch im Jahresverlauf CO₂-neutralen Strom in Höhe von 86.536 kWh/a. Obwohl nicht der gesamte erzeugte Strom unmittelbar vom Gebäude selbst verbraucht wird, kann dieser Betrag von der Gesamtstrombilanz abgezogen werden. Der nicht verbrauchte Stromanteil wird in das Netz eingespeist und von anderen Nutzern verwendet. Somit ergibt sich eine negative CO₂-Bilanz, die mit 434 g/kWh CO₂ berechnet wird.

Die Differenz zwischen dem verbrauchten Strom und dem erzeugten Strom für die Berechnung der CO₂-Bilanz beträgt 100.295 kWh/a. Dies führt zu einem CO₂-Ausstoß von 43.528 kg/a CO₂, basierend auf einem angenommenen CO₂-Ausstoß von 434 g/kWh CO₂ für das Stromnetz. Zusätzlich verursacht die etwa 20%ige Beheizung durch Fernwärme einen CO₂-Ausstoß von 12.022 kg/a. Insgesamt resultiert in dieser Variante des Energieversorgungssystems eine CO₂-Emission von 55.550 kg bzw. 55,5 Tonnen im Jahr.

Bei WP_PVT berechnet sich der CO₂-Ausstoß wie folgt: Der verbrauchte Strom aus dem Netz beträgt 100.946 kWh/a, was einer CO₂-Emission von 43.810 kg/a CO₂ entspricht.

Beim Heizen wird etwa 20 % der benötigten Wärmeenergie durch Fernwärme erzeugt. Dies entspricht einem CO₂-Ausstoß von 12.060 kg/a. Zusammen ergibt dies eine Gesamtsumme von 55.871 kg/a CO₂.

Die Daten bezüglich des CO₂-Ausstoßes bzw. der CO₂-Ersparnis sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Vergleich der CO₂-Emission der drei Systemvarianten pro Jahr

Systemvariante	FW	WP_PV	WP_PVT
CO ₂ -Ausstoß beim Heizen [kg]	59.400	12.022	12.060
CO ₂ -Ausstoß beim Stromverbrauch [kg]	42.405	43.528	43.810
CO ₂ -Ausstoß gesamtes System [kg]	101.805	55.550	55.871
CO ₂ -Ersparnis [%]	0	44,78	44,46

Wie aus der Tabelle 3 ersichtlich ist, sparen jeweils 44,78% und 44,46% jährlich an CO₂-Emission. Abbildung 24 zeigt der Vergleich der CO₂-Emissionen der drei Systeme.

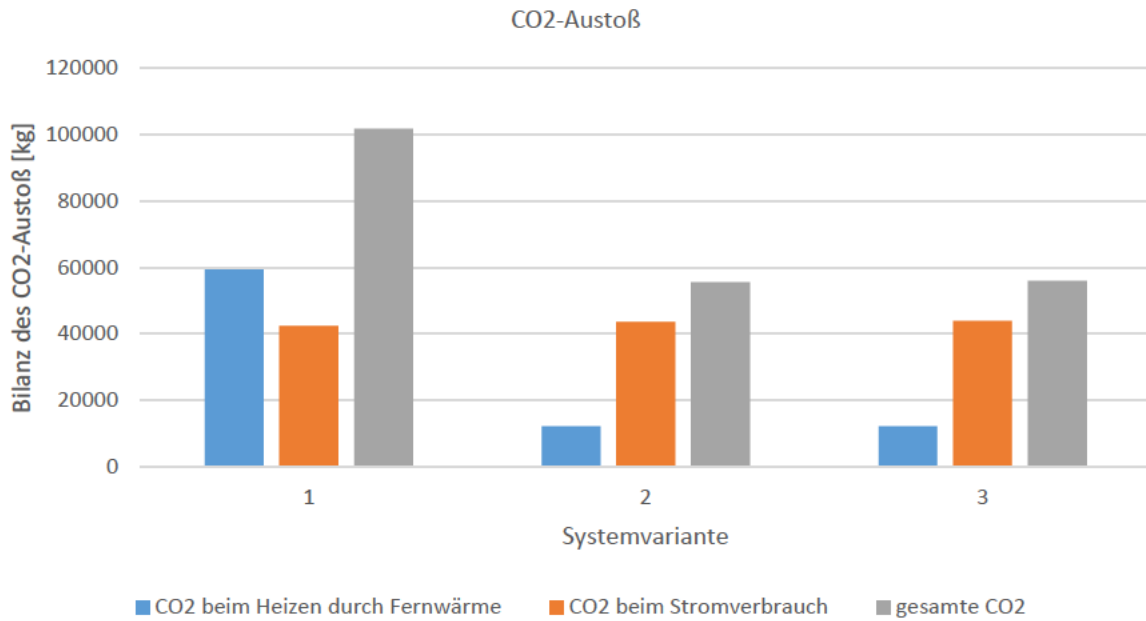


Abbildung 24: CO₂-Emission der Systeme

Bei einer Annahme von 8,4 Tonnen CO₂-Ausstoß von einem Vier-Personen-Haushalt in einem Einfamilienhaus erzeugt WP_PV 5,50-fache und WP_PVT 5,46-fache solcher Häuser weniger CO₂ als FW. [28]

7.1.4 Primärenergie:

Ein weiterer entscheidender Faktor für die Beurteilung der Nachhaltigkeit der Energieversorgung ist der Bedarf an Primärenergie. Die Tabelle 4 zeigt die Energiefaktoren für unterschiedlichen Energieträgern [29].

Bei FW beträgt 175.874 kWh/a Primärenergie für den Stromverbrauch, mit der Annahme von 1,8 als Primärenergiefaktor für Strom. Mit der Annahme von Primärenergiefaktor von 1,3 für die Fernwärme beträgt die Primärenergie 390.000 kWh/a für das Heizen, was in der Summe für FW 565.874 kWh/a entspricht.

Tabelle 4: Übersicht der verwendeten Primärenergiefaktoren [29]

Energieträger	Primärenergiefaktoren (nicht erneuerbarer Anteil)
Erdwärme, Geothermie, Solarthermie, Umgebungswärme, Abwärme innerhalb des Gebäudes, Erdkälte, Umgebungskälte Strom aus PV und Windkraft (gebäudenah erzeugt)	0
Holz (Pellets bzw. Hackschnitzel)	0,2
Biogas, Bioöl (im unmittelbaren räumlichen Zusammenhang mit dem Gebäude erzeugt)	0,5
Fern- bzw. Nahwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung, Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplung (gebäudeintegriert oder gebäudenah erzeugt)	0,7
Heizöl, Erdgas, Flüssiggas, Biogas, Bioöl	1,1
Fern- und Nahwärme (Heizwerk)	1,3
Strom	1,8
ins Netz eingespeister Strom aus KWK	2,8

Sowohl für WP_PV als auch für WP_PVT muss auf einer Seite die Differenz zwischen dem Stromverbrauch und der Stromerzeugung mit dem Primärenergiefaktor multipliziert werden, und auf der anderen Seite kommt die Primärenergie des Anteils an Fernwärme dazu. Für das zweite System entspricht dies einem Stromverbrauch von 180.531 kWh/a und einem Fernwärmeanteil von 78.934 kWh/a. Somit ergibt sich eine Gesamtprimärenergie von 259.465 kWh/a.

Bei WP_PVT beträgt die Primärenergie für den Stromverbrauch 181.702 kWh/a und für den Fernwärmeanteil 79.188 kWh/a. Insgesamt entspricht dies einem Wert von 260.891 kWh/a Primärenergie. In der Abbildung 25 sind die Primärenergien der untersuchten Energien zum Vergleich veranschaulicht.

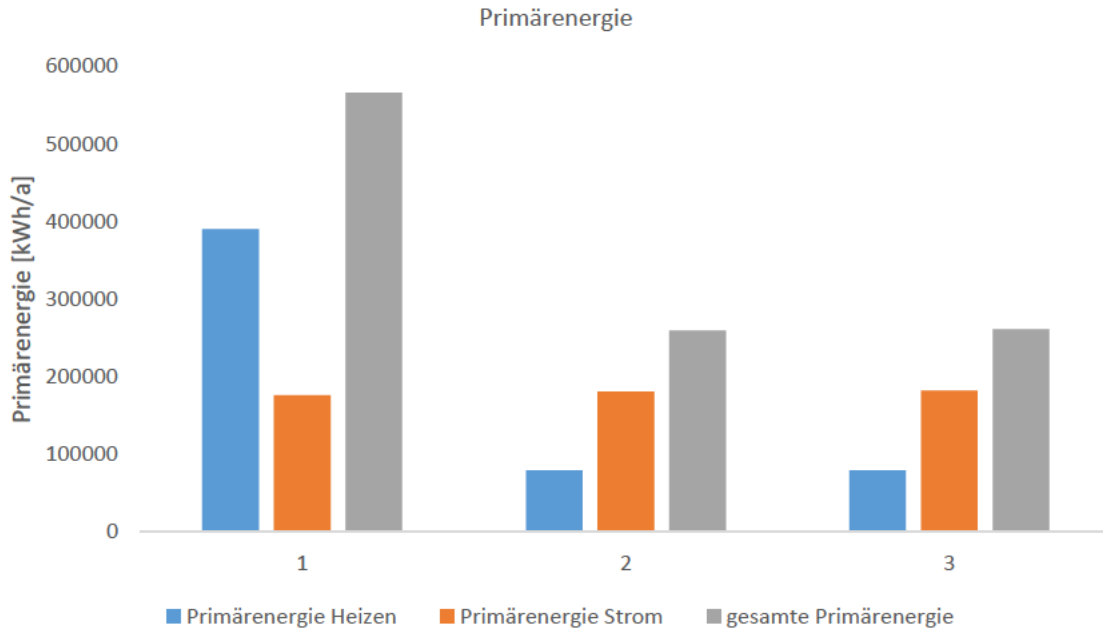


Abbildung 25: Primärenergien der untersuchten Systeme

In der Tabelle 5 sind die ermittelten Daten der drei Varianten zum Vergleich tabellarisch dargestellt.

Tabelle 5: Vergleich der Primärenergie der drei Varianten

	FW	WP_PV	WP_PVT
Primärenergie Heizen [kWh/a]	390000	78934,57	79188
Primärenergie Strom [kWh/a]	175874	180531	181702
Primärenergie des Gesamtsystems [kWh/a]	565874	259.465	260891
Ersparnis an Primärenergie gegenüber das Ausgangssystem [%]	-	45,85	46,10

Wie in der Tabelle 5 ersichtlich ist, beträgt die Einsparung an Primärenergie bei der zweiten Variante 45,85 % und bei der dritten Variante 46,1 %.

7.1.5 Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit einer Energieversorgungsanlage wird durch Investition und Betriebskosten (Energiekosten und Wartung) bestimmt und ist in der Praxis bisher oft die wichtigste Grundlage, um sich für ein System zu entscheiden.

Im Folgenden werden auf einer Seite die Anschaffungskosten berechnet, auf der anderen Seite die Energiekosten der drei Varianten miteinander verglichen, um herauszufinden, ob ein Umstieg auf solche Systeme wirtschaftlich Sinn macht. Es muss darauf hingewiesen werden, dass die Preise überschlägig anhand der aktuellen Preise aus dem Internet angenommen wurden.

7.1.5.1 Investitionskosten:

FW wird in dieser Arbeit als bereits existierend angenommen, und die Anschaffungskosten für die Installation eines Fernwärmeanschlusses und der Stromversorgung des Referenzgebäudes werden in den Berechnungen nicht berücksichtigt

Investitionskosten WP_PV:

Für die Realisierung dieses Systems entstehen Investitionskosten sowohl für die Wärmepumpe und ihr Zubehör als auch für die PV-Anlage. Für die PV-Anlage werden 285 Stück der Module "Trina Vertex S" mit 425 W angenommen, da sie von der Fläche und der elektrischen Leistung her gleich sind wie die untersuchten PVT-Module. Die Kosten für die PV-Module werden mit 300 € pro Kilowatt Nennleistung angenommen [30]. Daher belaufen sich die Investitionskosten auf insgesamt 36.337 € für die PV-Module.

Für die Wechselrichter werden Kosten in Höhe von 200 € pro Kilowatt Peak Leistung angenommen, was insgesamt 24.225 € ausmacht [31].

Für die Aufständerung bzw. Unterkonstruktion der PV-Module werden Kosten in Höhe von 100 € pro Kilowatt Peak Leistung, und für Montage sowie Zubehör werden Kosten in Höhe von 200 € pro Kilowatt Peak Leistung angenommen [32]. Für diese Kosten ergibt sich daher eine Gesamtsumme von 36.337 €.

Der Preis für den 500-Liter-großen Pufferspeicher des Modells JPSM 500 von Juratherm beträgt etwa 500 € [33].

Für die PV-Anlage ergibt sich somit eine Summe von 97.400 €.

Für die Wärmepumpe gestaltet es sich schwierig, genaue Informationen zu den Anschaffungskosten für große Wärmepumpen zu erhalten. Trotz mehrerer Anfragen bei verschiedenen Herstellern und Heizungsfirmen konnten keine präzisen Informationen zu den Anschaffungskosten solcher Wärmepumpen gewonnen werden. Bei kleineren Wärmepumpen verhält sich der Preis in der Regel nahezu linear zur Leistung. Bei größeren Wärmepumpen hingegen fällt der Preis in der Regel ab einer bestimmten Leistungsgrenze mit zunehmender Größe ab. Daher wird ein Preis von 700 € pro Kilowatt Leistung für die Wärmepumpe anhand einer Interpolation mehrerer Geräte verschiedener Hersteller und Größen für beide Varianten angenommen. Dies ergibt einen Preis von 70.000 € für die Anschaffung einer Luft-Wasser-Wärmepumpe mit 100 kW Nennleistung bei WP_PV. Für die Anschaffung des gesamten Systems wird weiterhin angenommen, dass die Wärmepumpen gefördert werden. Die Gesamtkosten belaufen sich auf 167.400 € ohne Förderung und 149.900 € mit einer angenommenen 25 % Förderung für die Wärmepumpe.

Investitionskosten WP_PVT:

Für die PVT-Module "PVT Solar Kollektor BlackDiamond BSM-425" wird ein Preis von 600 € pro Kilowatt Peak Leistung angenommen, was Gesamtkosten von 72.675 € entspricht. Die Investitionskosten für Zubehör und Montage werden bei Hybridkollektoren um 10 % höher angesetzt als bei PV-Anlagen, um zusätzliche Kosten für Rohranschlüsse, Arbeitsmedium usw. zu berücksichtigen. Dies ergibt Gesamtkosten von 39.971 €.

Der Pufferspeicher kostet 500 €, und der Wechselrichter hat aufgrund der identischen elektrischen Leistung dieselben Kosten wie beim zweiten System, was zu Gesamtkosten von 24.225 € für den Wechselrichter führt.

Für die 90 kW Nennleistung der Sole-Wasser-Wärmepumpe sind Kosten von 63.000 € zu berücksichtigen. Die Gesamtkosten des dritten Systems belaufen sich also auf 137.371 € für die PVT-Anlage und 63.000 € für die Wärmepumpe. Ohne Förderung ergibt sich eine Gesamtsumme von 200.371 €, und mit einer angenommenen 25%igen Förderung für die Wärmepumpe beträgt die Gesamtsumme 184.621 €.

7.1.5.2 Betriebskosten:

Beim Energieversorgungssystem für das Gebäude müssen die Energiekosten für das Heizen und die elektrische Energie separat berechnet werden.

Betriebskosten FW:

Für die Wärmebereitstellung durch Fernwärme wird der gesamte Wärmeverbrauch mit einem Preis von 11,85 ct/kWh berechnet (bundesweiter Durchschnitt) [34]. Dies führt zu jährlichen Kosten von 35.550 €/a. Die Wartungskosten bei WP_PV und WP_PVT sind höher als bei FW, diese sind jedoch vernachlässigbar klein sind. Daher werden die Wartungskosten hier vernachlässigt.

Für den Strom wird ein Preis von 23,32 ct/kWh für Industriebetriebe mit großem Verbrauch angenommen [35] was bei einem Verbrauch von 97.707 kWh/a Kosten von 22.785 €/a verursacht. Die Gesamtkosten für die Energiebereitstellung bei diesem System belaufen sich auf 58.335 €/a.

Betriebskosten WP_PV:

Bei diesem System wird 60.718 kWh/a durch Fernwärme bereitgestellt, was Kosten von 7.195 €/a verursachen.

Für den Strom müssen 142.462 kWh/a aus dem Stromnetz bezogen werden, und zwar zum gleichen Preis wie beim Ausgangssystem. Dies beläuft sich auf Kosten von 33.222 €/a. Der Überschuss von 42.167 kWh/a an Stromproduktion durch die PV-Anlage wird mit einer Einspeisevergütung von 5,8 ct/kWh vergütet. Diese Einspeisevergütung von 2.445 €/a muss von den Stromkosten abgezogen werden. Daher belaufen sich die tatsächlichen Kosten durch Stromverbrauch auf insgesamt 30.776 €/a, die zusammen mit den Heizkosten aus der Fernwärme Gesamtkosten von 37.971 €/a ergeben.

Betriebskosten WP_PVT:

Die Beheizung von 60.914 kWh/a mit Fernwärme verursacht Kosten von 7.218 €/a. Ein Wert von 143.163/a kWh elektrischer Energie muss aus dem Stromnetz bezogen werden, was bei den entsprechenden Strompreisen zu Ausgaben von 33.385 €/a führt. Für die Einspeisung von 42.217 kWh/a ins Stromnetz können Einnahmen in Höhe von 2.448 €/a erzielt werden. Die tatsächlichen Kosten für den Stromverbrauch belaufen sich somit auf 30.937 €/a. Zusammen mit den Kosten für den Fernwärmeanteil ergibt sich eine Gesamtsumme von 38.155 €/a für die Energiebereitstellung in dieser Variante.

7.1.5.3 Amortisationszeit:

Die Amortisationszeit ist einer der entscheidendsten Faktoren bei der Auslegung und wirtschaftlichen Einschätzung eines Energieversorgungssystems. Sie stellt die Anzahl der Jahre dar, die benötigt werden, um die ursprünglichen Investitionskosten zurückzugewinnen. Hierfür werden die Investitions- bzw. Herstellungskosten durch den jährlichen Gewinn bzw. Cashflow geteilt [36].

Trotz der hohen Investitionskosten beträgt die Amortisationszeit für das zweite System 7,36 Jahre. Nach dieser Zeitspanne hat sich das Energiesystem vollständig abbezahlt. Für das dritte System liegt die Amortisationszeit bei 9,14 Jahren, was immer noch als akzeptabel betrachtet werden kann.

In der Tabelle 6 sind die wirtschaftlichen Aspekte der untersuchten Energieversorgungssysteme zusammengefasst.

Tabelle 6: Vergleich der Wirtschaftlichkeit der drei Systemvarianten

Wirtschaftlichkeit	FW	WP_PV	WP_PVT
Anschaffungskosten Wärmepumpe [€]	-	70.000	63.000
Anschaffungskosten Module [€]	-	36.337	72.675
Anschaffungskosten Zubehör und Montage [€]	-	36.337	39.971
Pufferspeicher [€]	-	500	500
Wechselrichter [€]	-	24.225	24.225
Summe Kosten [€]	-	167.400	200.371
Förderung der Wärmepumpe [€]	-	17.500	15.750
Anschaffungskosten für verschiedene Variante abzüglich der Förderung [€]	-	149.900	184.621
Heizkosten durch Fernwärme [€/a]	35.550	7.195	7.218
Stromkosten aus dem Stromnetz [€/a]	22.785	33.222	33.385
Eispeisevergütung [€/a]	-	2.445	2.448
tatsächliche jährliche Kosten für Strom (Einspeisevergütung abgezogen) [€/a]	22.785	30.776	30.937
Gesamte Energiekosten des Systems [€/a]	58.335	37.971	38.155
Gesamtes jährliches Ersparnis [€/a]	-	20.363	20.180
Amortisationszeit [Jahr]	-	7,36	9,14
Gesamte Energiekosten des Systems in einem Zeitraum von 20 Jahren [€]	1.166.709	759.434	76.3107
Ersparnis des Systems in einem Zeitraum von 20 Jahren ohne Berücksichtigung der Investitionskosten [€]	-	407.275	403.602
Ersparnis an Energiekosten nach 20 Jahren [%]	-	34,9	34,6
Bilanz nach 20 Jahren [€]	1.166.709	609.534	578.486
Gesamtes Ersparnis nach 20 Jahren mit der Berücksichtigung der Investitionskosten [€]	-	257.375	218.981
Gesamtes Ersparnis nach 20 Jahren [%]	-	22,06	18,77

Wie aus der Tabelle 6 ersichtlich ist, ergibt sich bei WP_PV eine Ersparnis von 407.275 € an Energiekosten in einem Betrachtungszeitraum von 20 Jahren. WP_PVT verzeichnet mit 403.602 € eine ähnliche Einsparung. Dies entspricht jeweils einer Ersparnis von 34,9 % bzw. 34,6 %, ohne dabei die Steigerung der Energiepreise in diesem Zeitraum zu berücksichtigen.

Unter Berücksichtigung der Investitionskosten belaufen sich die Gesamtkosten über einen Zeitraum von 20 Jahren bei WP_PV auf 909.334 €. Dies bedeutet eine Ersparnis von 257.375 € bzw. 22,06 % im Vergleich zu den Energiekosten des Ausgangssystems, die 1.166.709 € betragen. Bei WP_PVT belaufen sich die Gesamtkosten für Energie und Investition auf 947.728 €, was eine Ersparnis von 218.981 € bzw. 18,77 % gegenüber den Energiekosten bei WP darstellt.

Die Wirtschaftlichkeit der drei Systeme in einem Zeitraum von 20 Jahren ist in der Abbildung 26 veranschaulicht.

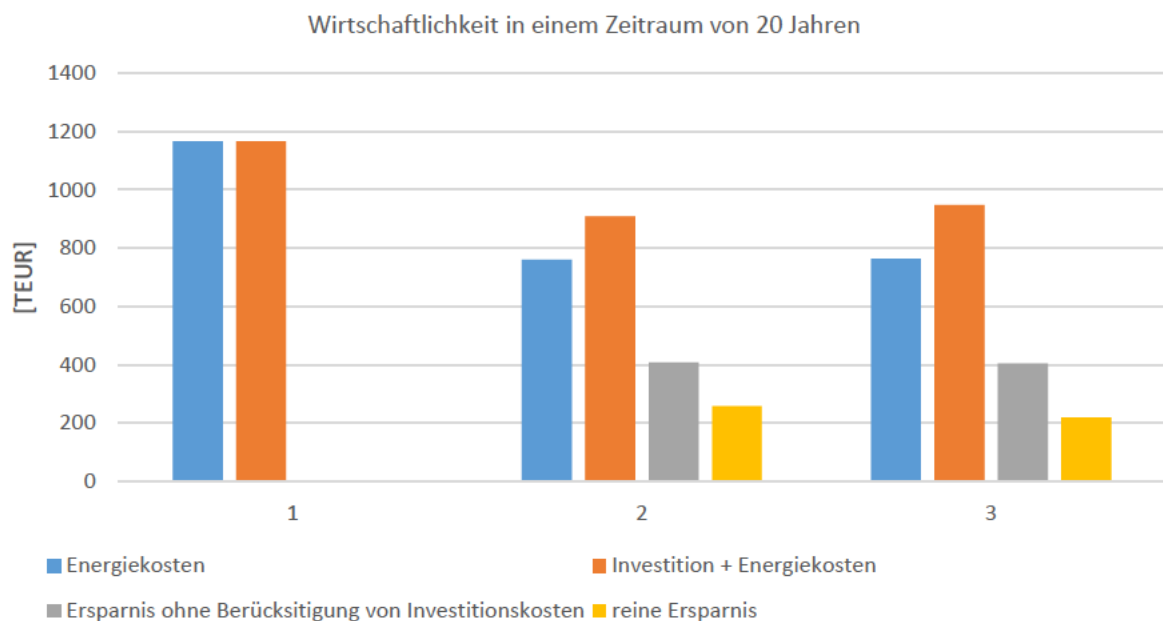


Abbildung 26: Wirtschaftlichkeit der drei Varianten

8 Bewertung und Analyse

Sowohl WP_PV als auch WP_PVT erzielen laut der Simulation hinsichtlich ökologischer und ökonomischer Aspekte zufriedenstellende Ergebnisse. Eine Einsparung von 45,85 % bei WP_PV und 46,1 % bei WP_PVT im Primärenergieverbrauch zeigt, dass solche Energieversorgungssysteme effizientere und umweltfreundlichere Alternativen zu einem System darstellen, das auf herkömmlicher elektrischer Energiebereitstellung aus dem Stromnetz und einer Wärmebereitstellung aus einem Fernwärmenetz basiert.

Auch hinsichtlich der CO₂-Emissionen zeigt sich, dass WP_PV mit einer Ersparnis von 45,85 % und WP_PVT mit 45,12 % im Vergleich zum Ausgangssystem umweltfreundlichere Alternativen sind. Nach Einführung der CO₂-Steuer erweisen sich die Systeme aus wirtschaftlicher Sicht als noch rentabler.

Die Amortisationszeit von 7,36 Jahren bei WP_PV ist ein akzeptabler Wert. Die Amortisationszeit bei WP_PVT beträgt mit 9,14 Jahren zwar 24,18% länger als bei WP_PV, liegt jedoch immer noch im guten Bereich.

Langfristig betrachtet erweisen sich die vorgeschlagenen Systeme als wesentlich kostengünstiger im Vergleich zu herkömmlichen Energieversorgungssystemen, die hauptsächlich auf fossilen Energien basieren und nicht regenerativ sind.

Der Vergleich zwischen dem ersten und zweiten System zeigt, dass die Kombination aus einer PVT-Anlage und einer Sole-Wasser-Wärmepumpe keine Verbesserung gegenüber der Kombination aus einer PV-Anlage und einer Luft-Wasser-Wärmepumpe darstellt. Im Gegenteil erhöhen die Mehrkosten aufgrund der Hybridkollektoren die Amortisationszeit um fast 24 %, obwohl eine kleinere Wärmepumpe verwendet wird. Es ist jedoch zu beachten, dass dieses System großes Potenzial für weitere Forschung und Verbesserungen in diesem Bereich bietet. Zu erwähnen ist, dass die von der ROM-Technik zur Verfügung gestellten Modelle für Wärmepumpen und PVT ergeben relativ schlechte JAZ, die unter den Angaben sonstiger Quellen sind (3 bis 5) [37]. Mit höheren JAZ ergeben sich noch deutlich größere Vorteile in den untersuchten Bereichen.

9 Vorschläge für weitere Untersuchungen

In dieser Arbeit werden verschiedene Vereinfachungen und Annahmen getroffen, die das Ergebnis beeinflussen. Die simulierten Modelle werden vereinfacht, und es werden mögliche Verluste durch Rohrleitungen, Kabel, Pufferspeicher, Wechselrichter und andere in realen Systemen üblicherweise vorhandene Komponenten nicht berücksichtigt. Ebenso werden bei den Simulationen des PV- und PVT-Systems keine Effekte durch Verschattung berücksichtigt.

Die Arbeit wurde für den Standort Hamburg und für ein einziges Jahr untersucht. Um genauere Ergebnisse zu erzielen, empfiehlt es sich, Simulationen für verschiedene Regionen mit unterschiedlichen Klimas und über mehrere Jahre mit unterschiedlichem Klima durchzuführen. Insbesondere an kälteren Standorten mit ausgeprägten Winterperioden und Schneefall sollte die Integration einer Schneeabrutschfunktion in Betracht gezogen werden. Es könnte auch sinnvoll sein, die PV- bzw. PVT-Module in solchen Regionen mit einem steileren Winkel zu installieren.

Zusätzlich könnte die Einbindung einer Warmwasserversorgung in ein PVT-Wärmepumpensystem sinnvoll sein. Durch die Wärmeabnahme aus den PVT-Modulen steigt der Ertrag, da die Effizienz der PV-Module mit steigender Temperatur abnimmt. In einem Bürogebäude ist jedoch der Warmwasserbedarf oft zu gering für eine solche Anwendung. Dennoch könnte dies in den Übergangszeiten zu einer Effizienzsteigerung führen. Es wird daher empfohlen, ein solches System in zukünftigen Arbeiten zu betrachten.

Aktuell erfolgt die Kühlung der Räumlichkeiten im Sommer durch Umluftanlagen. Diese Funktion kann von einer Wärmepumpe übernommen werden, die mit einer Kühlfunktion ausgestattet ist und im Sommer kühlen kann. Es ist interessant, dies in zukünftigen Arbeiten zu betrachten.

Eine zusätzliche Option zur Verbesserung der Effizienz besteht darin, einen Batteriespeicher in das System zu integrieren. Obwohl dies die Effizienz steigert, sind Batterien jedoch kostenintensiv in der Anschaffung. Es gibt außerdem Möglichkeiten für Energiemanagement bei PV- bzw. PVT-Anlagen, um den Eigenverbrauch zu erhöhen. Es ist daher ratsam, solche Systeme in künftigen Studien zu berücksichtigen.

10 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein nachhaltiges und regeneratives Energieversorgungssystem für das Bürogebäude der Firma "ROM Technik GmbH" in Hamburg entworfen. Im bestehenden System (FW) werden die Büroräume über Heizkörper mithilfe von Fernwärme beheizt, während das Warmwasser durch einen Durchlauferhitzer bereitgestellt wird. Der Strombedarf wird durch den Bezug aus dem Stromnetz gedeckt. Für die dynamische Simulation werden die Verbrauchsprofile für den Wärmebedarf in Abhängigkeit von der Außentemperatur linear interpoliert. Ebenso wird der Verlauf des Stromverbrauchs für eine dynamische Simulation über ein Jahr ermittelt. Der aus Verbrauchsmessungen abgeschätzte Wärmebedarf beträgt 300 MWh/a, während der elektrische Bedarf bei 97.7 MWh/a liegt.

Als Alternative zum herkömmlichen Energieversorgungssystem werden zwei Systeme in der vom Unternehmen entwickelten Bibliothek HKE-Sim auf Basis der Modellierungssprache Modelica im Simulationstool Dymola 2023 erstellt. Anschließend werden dynamische Simulationen durchgeführt, und schließlich werden die Ergebnisse miteinander verglichen.

Die erste Alternative (WP_PV) besteht aus einem Energieversorgungssystem, das eine Luft-Wasser-Wärmepumpe in Kombination mit einer Photovoltaikanlage umfasst. Die PV-Anlage erzeugt Strom und deckt einen Teil des Stromverbrauchs des Systems ab. Zwischen dem Energieversorger (Wärmepumpe) und dem Verbraucher ist ein Pufferspeicher integriert.

Die zweite untersuchte Alternative (WP_PVT) ist eine solarunterstützte Sole-Wasser-Wärmepumpe in Kombination mit Hybridkollektoren. Die Wärmepumpensysteme werden so ausgelegt, dass etwa 80 % des Heizbedarfs durch die Wärmepumpe und der Rest durch Fernwärme gedeckt wird. Auf dieser Weise werden die Wärmepumpen deutlich kleiner und somit wirtschaftlicher ausgelegt. Diese Auslegung ist ebenso für Systeme mit Gas- oder Ölkessel übertragbar.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird bei WP_PV eine Luft-Wasser-Wärmepumpe mit einer Leistung von 100 kW und einem COP von 4,6, wie es die Simulationsergebnisse zeigten, als notwendig erachtet. Bei der zweiten Alternative hat sich eine Sole-Wasser-Wärmepumpe mit einer Leistung von 90 kW und ebenfalls einem COP von 4,6 als erforderlich herausgestellt. Darüber hinaus wird analysiert, inwieweit die Stromproduktion der PV-, bzw. PVT-Anlage zur Abdeckung des Eigenverbrauchs verwendet wird.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die WP_PV einen Deckungsanteil von 23,75% erreicht. WP_PVT weist mit einem Deckungsanteil von 22,48 % ein ähnliches Ergebnis auf. Obwohl die PVT-Anlage durch die Wärmeaufnahme aus den Hybridkollektoren eine höhere Effizienz erwartet wird, wird dieser Effekt in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Einerseits fehlt die Wärmequelle im Sommer, da in diesem System keine Warmwasserbereitstellung integriert ist, und andererseits ist der Effekt in diesem Simulationsprogramm schwer modellierbar.

Beide Anlagen erzielen einen jährlichen elektrischen Ertrag von etwa 86.536 kWh/a. Der elektrische Verbrauch des WP-Heizsystems beträgt bei WP_PV ungefähr 89.124 kWh und bei WP_PVT etwa 89.775 kWh/a.

Durch mehrere Simulationen wird nachgewiesen, dass eine Energieversorgung mittels einer Luft-Wasser-Wärmepumpe in Kombination mit einer PV-Anlage die besten Ergebnisse liefert (WP_PV). Mit diesem System reduziert sich der CO₂-Ausstoß im Vergleich zum herkömmlichen System (FW) um 45,4 % pro Jahr. Die Sole-Wasser-Wärmepumpe in Kombination mit einer PVT-Anlage (WP_PVT), erzielt mit 45,1 % eine sehr ähnliche Reduktion im Vergleich zur WP_PV.

Bei der Primärenergie werden ebenso bessere Ergebnisse im Vergleich zu dem konventionellen Energieversorgungssystem erzielt. WP_PV benötigt 45,8 % weniger Primärenergie als FW, während WP_PVT eine Reduzierung von 46,1 % gegenüber FW erreicht. Auch hinsichtlich der Jahresarbeitszahl (JAZ) zeigen beide Systeme ähnliche Werte. Für WP_PV beträgt die JAZ etwa 2,68 und für WP_PVT etwa 2,63.

Die Anschaffung der Energieversorgungssysteme für das Beispielgebäude erfordert eine Investition von ca. 150.000 € bei WP-PV (abzüglich der aktuellen Förderung von 25 % bei der Anschaffung der Wärmepumpe) und bei der WP_PVT ca. 185.000 €. Diese Investition zahlt sich, unter Berücksichtigung der aktuellen angenommenen Preise, jedoch nach 7,3 Jahren bei WP_PV und nach 9,1 Jahren bei WP_PVT aus. Über einen Zeitraum von 20 Jahren betrachtet, erweisen sich WP_PV und WP_PVT als wirtschaftliche Optionen. Ohne Berücksichtigung einer Steigerung der Energiekosten in den nächsten Jahren belaufen sich die Ersparnisse an den Energiekosten bei WP_PV auf 407.275 € und bei WP_PVT auf 403.602 €, was jeweils ein Ersparnis von 34,9 % bzw. 34,6 % im Vergleich zu FW entspricht. Ohne Umstellung auf solche regenerativen Energieversorgungssysteme wären in diesem Zeitraum Energiekosten in Höhe von 1.166.709 € zu berechnen. Selbst unter Berücksichtigung der Investitionskosten ist eine Einsparung von 257.375 € bei WP_PV zu erwarten, was einer Ersparnis von 22,06 % im Vergleich FW entspricht. Bei WP_PVT beträgt die Ersparnis 218.981 € bzw. 18,77 % im Vergleich zu FW.

11 Ausblick

Bei der Implementierung regenerativer Energieversorgungssysteme ergeben sich bedeutende Vorteile im Kontext des Umweltschutzes, der Klimawandelbekämpfung und der langfristigen Nachhaltigkeit. Die kontinuierliche Forschung und Integration neuer Technologien im Bereich erneuerbarer Energien sind unweigerlich auf dem Weg zu einer effizienteren und umweltfreundlicheren Energieversorgung. Diese Bemühungen sind von entscheidender Bedeutung, um den Übergang zu nachhaltigen Energiequellen zu erleichtern und positive Auswirkungen auf die Umwelt sowie langfristige wirtschaftliche Vorteile zu erzielen.

Diese Studie stellt heraus, dass die Kombination aus der Stromerzeugung mittels Photovoltaik und einem Heizsystem, das eine Wärmepumpe einschließt, positive Ergebnisse in Bezug auf Nachhaltigkeit und CO₂-Einsparungen liefert. Die untersuchten Systeme sind ebenfalls in einer Kombination mit gängigen Gas- und Ölkessel übertragbar. Im Hinblick auf CO₂-Einsparung sind sogar bessere Ergebnisse im Vergleich zu einer Kombination mit Fernwärme zu erwarten.

Unter den untersuchten Bedingungen ist keine energetische sowie wirtschaftliche Verbesserung durch die Kombination von Photovoltaik und Solarthermie in einem Modul im Vergleich zur Kombination einer Wärmepumpe und einer Photovoltaik-Anlage festgestellt zu erkennen. Ein Vorteil solcher Systeme ist der geräuscharme Betrieb. Das ist entscheidender Faktor bei dichter Bebauung.

Derzeit wird intensiv an der Weiterentwicklung von Technologien wie Photovoltaik, Solarthermie, PVT und Wärmepumpen sowie deren Kombinationen, insbesondere von PV- und PVT-Anlagen mit Wärmepumpen, geforscht. Es ist zu erwarten, dass diese Technologien in der Zukunft kontinuierlich verbessert werden. Gleichzeitig unterliegen die Energiepolitik und die dazugehörige Gesetzgebung häufigen Veränderungen. Die gegenwärtige Tendenz zeigt die schrittweise Abschaffung von Förderungen, begleitet von einer gleichzeitigen Verschärfung der Gesetze im Bereich erneuerbarer Energien und dem schrittweisen Ausstieg aus fossilen Brennstoffen. In diesem Zusammenhang wird erwartet, dass regenerative und nachhaltige Energieversorgungssysteme in der Zukunft zunehmend an Bedeutung gewinnen und dabei immer effizienter und kostengünstiger werden.

VII. Literaturverzeichnis

[1] **BAFA 2024:** Anlagen zur Wärmeerzeugung (Heizungstechnik) (URL: https://www.bafa.de/DE/Energie/Effiziente_Gebaeude/Sanierung_Wohngebaeude/Anlagen_zur_Waermeerzeugung/anlagen_zur_waermeerzeugung_node.html, aufgerufen am: 17.01.2024)

[2] **UBA-Studie:** So können die Klimaziele noch erreicht werden

(URL:[https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/uba-studiesokoennendieklimaziele2030noch#:~:text=Das%20deutsche%20Klimaschutzgesetz%20\(KSG\)%20sieht,2045%20Netto%2DTreibhausgasneutralit%C3%A4t%20erreicht%20werden.](https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/uba-studiesokoennendieklimaziele2030noch#:~:text=Das%20deutsche%20Klimaschutzgesetz%20(KSG)%20sieht,2045%20Netto%2DTreibhausgasneutralit%C3%A4t%20erreicht%20werden.,), aufgerufen am : 17.01.2024)

[3] **Liste der förderfähigen Wärmepumpen mit Prüf-/Effizienznachweis** (Stand: 01. Januar 2024)

(URL:https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/beg_waermepumpen_pruef_effizienznachweis.html,aufgerufen am: 17.01.2024)

[4] **BAFA-Förderprogramm** im Überblick

(URL:https://www.bafa.de/DE/Energie/Heizen_mit_Erneuerbaren_Energien/Foerderprogramm_im_Ueberblick/foerderprogramm_im_ueberblick_node.html,aufgerufen am: 17.01.2024)

[5] **EEG 2023/24:** Was heute für Photovoltaik-Anlage gilt und was geplant ist

(URL: <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/energie/erneuerbare-energien/eeg202324-was-heute-fuer-photovoltaikanlagen-gilt-und-was-geplant-ist75401#:~:text=Diese%20Verg%C3%BCtungss%C3%A4tze%20sind%20auch%20f%C3BCr,7%2C1%20Cent%20pro%20kWh.>, aufgerufen am 17.01.2024)

[6] **Burkhardt 2024:** Einspeisevergütung 2024: Tabelle & Neuerungen

(URL: <https://echtsolar.de/einspeiseverguetung/>, aufgerufen am: 21.12.2023)

[7] **google earth**

[8] **Deutscher Wetter Dienst 2015:** Testreferenzjahre (TRY)

(URL:<https://www.dwd.de/DE/leistungen/testreferenzjahre/testreferenzjahre.html;jsessionid=14E79498E3BD2FCCE6BCEE6F2A600E6.live11051?nn=507312>, aufgerufen am: 20.11.2023)

[9] **GASRAF 2023:** Stromsparen-das funktioniert auch im Unternehmen

(URL: <https://www.gasag.de/magazin/energiesparen/stromverbrauch-unternehmen#:~:text=Wie%20hoch%20ist%20der%20durchschnittliche,kWh%2Fm%20Gesamtfl%C3%A4che%20pro%20Jahr>, aufgerufen am: 04.01.2024)

[10] **Batterjee 2019**: Bachelorarbeit: Optimierte Auslegung der Heizungs- und Lüftungssysteme eines Mehrfamilienhauses unter Einsatz von Wärmerückgewinnung zur Erfüllung der IFB Effizienzhaus 40, HAW Hamburg

[11] **Prof. Dr. Freude** (Universität Leipzig) Energie-Grundlagen

(URL: <https://home.uni-leipzig.de/energy/energiegrundlagen/13.html#:~:text=Tc%20bezeichnet%20die%20Temperatur,Th%20%E2%88%92%20Tc>), aufgerufen am:15.01.2024)

[12] **VDI-Richtlinie 4650**

(<https://www.vdi.de/richtlinien/unsere-richtlinien-highlights/vdi-4650>, aufgerufen am: 17.01.2024)

[13] **Dohmann 2016**: Thermodynamik der Kälteanlagen und Wärmepumpen (Vol. 1). Springer Berlin Heidelberg.

[14] **Dr. Zunhäusern, Bamberger, Beggenstos 2017**:Energiesysteme mit Photovoltaische Thermischen Solarkollektoren

[15] **Fischer 2022**: PVT-Kollektoren – eine alternative Wärmequelle für die Wärmepumpe

(URL: https://www.duesseldorf.de/fileadmin/Amt19/saga/pdf/Stellschrauben-Vortraege/Fischer_-_PVT_Kollektoren_Waermepumpen_compressed.pdf, aufgerufen am 02.12.2023)

[16] **Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE 2016**

(URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/pvtgen2.html>, aufgerufen am: 07.11.2023)

[17] **Girard, Gago, Muneer, Caceres 2015**: Higher ground source heat pump COP in a residential building through the use of solar thermal collectors, Renewable Energy 80, pp26-39.

[18] **Mette, Kerskes, Drück 2012**: Concepts of long-term thermochemical energy storage for solar thermal applications – Selected examples, Energy Procedia 30, pp321-330

[19] **Plössing 2012**: Masterarbeit:Konzepterarbeitung für eine solarunterstützte Wärmepumpe, Technische Universität Graz

[20] **Umweltbundesamt 2023**: Warmwasser Umweltbundesamt

(URL: <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/heizen-bauen/warmwasser#wie-sie-ihre-kosten-fur-warmwasser-senken-konnen>, aufgerufen am: 12.01.2024)

[21] **Gräber 2022:** Dymola und Modelica

(URL: <https://tlk-energy.de/blog/dymola-modelica>, aufgerufen am: 09.01.2024)

[22] **Amintavakoli 2021:** Identifikation und Optimierung von Systemen zur Beheizung, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung von Bürogebäuden zur Erfüllung von GEG und BEG, technische Universität Hamburg

[23] **DASSUALT SYSTEMS**

(URL: <https://www.3ds.com/de/produkte-und-services/catia/produkte/dymola/>, aufgerufen am: 04.01.2024)

[24] **Hamburger Energiewerke GmbH**

(URL: <https://www.hamburger-energiewerke.de/wissen-themen/fernwaerme/wie-funktioniert-fernwaerme#:~:text=Bei%20einer%20Fernw%C3%A4rmeversorgung%20dient%20Hei%C3%9Fwasser,zum%20Geb%C3%A4ude%20des%20Endabnehmers%20gelegt.>, aufgerufen am: 04.01.2024)

[25] **PVT Solar AG**

(URL: <https://www.pvt.solar/hybridkollektor/uebersicht>, aufgerufen am: 02.11.2023)

[26] **co2online gemeinnützige Beratungsgesellschaft mbH:** Fernwärme: Technik, Nutzung, Kosten und Alternativen

(URL: <https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/heizung/fernwaerme/#:~:text=Den%20durchschnittlichen%20Fernw%C3%A4rme%20Wert%20von,deutlich%20mehr%20CO2%2DEmissionen.>, aufgerufen am: 19.12.2023)

[27] **Statista GmbH 2023:** Entwicklung des CO₂-Emissionsfaktors für den Strommix in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2022

(URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38897/umfrage/co2-emissionsfaktor-fuer-den-strommix-in-deutschland-seit-1990/>, aufgerufen am: 19.12.2023)

[28] **NIBE Systemtechnik GmbH:** Wieviel CO₂ verursacht mein Haus?

(URL: <https://www.nibe.eu/de-de/support/artikel/wie-viel-co2-verursacht-mein-haus#:~:text=Ein%20Vier%2DPersonen%2DHaushalt%20eines,des%20gesamten%20Energieverbrauches%20des%20Haushaltes.>, aufgerufen am: 12.01.2024)

[29] **BAFA 2022:** Technisches Merkblatt, Bundesförderung für das Pilotprogramm Einsparzähler

[30] **Kümpel, wegatech PHOTOVOLTAIK:** KOSTEN EINER SOLARANLAGE IN 2023

(URL: [https://www.wegatech.de/ratgeber/photovoltaik/kosten-und-wirtschaftlichkeit/photovoltaikanlagen/#:~:text=Der%20Modulpreis%20bewegt%20sich%20aktuell,%E2%82%AC%20an%20reinen%20Modulkosten%20an.](https://www.wegatech.de/ratgeber/photovoltaik/kosten-und-wirtschaftlichkeit/photovoltaikanlagen/#:~:text=Der%20Modulpreis%20bewegt%20sich%20aktuell,%E2%82%AC%20an%20reinen%20Modulkosten%20an.,), aufgerufen am:19.12.2023)

[31] **Vöpel 2023:** Kosten und Preise für Wechselrichter in 2023

(URL: [https://gruenes.haus/wechselrichter-kosten-preise/#:~:text=Der%20Preis%20f%C3%BCr%20einen%20Wechselrichter,%E2%82%AC%200pro%20installierter%20kWp%20Leistung.](https://gruenes.haus/wechselrichter-kosten-preise/#:~:text=Der%20Preis%20f%C3%BCr%20einen%20Wechselrichter,%E2%82%AC%200pro%20installierter%20kWp%20Leistung.,), aufgerufen am: 20.12.2023)

[32] **Anondi GmbH 2023:** Photovoltaikanlage Kosten

(URL: [https://www.solaranlage-ratgeber.de/photovoltaik/photovoltaik-wirtschaftlichkeit/photovoltaik-kosten/#:~:text=Durchschnittlich%20betragen%20die%20Kosten%20f%C3%BCr,die%20Kosten%20f%C3%BCr%20die%20Solarmodule.](https://www.solaranlage-ratgeber.de/photovoltaik/photovoltaik-wirtschaftlichkeit/photovoltaik-kosten/#:~:text=Durchschnittlich%20betragen%20die%20Kosten%20f%C3%BCr,die%20Kosten%20f%C3%BCr%20die%20Solarmodule.,), aufgerufen am: 20.12.2023)

[33] **idealo internet GmbH.:** Juratherm JPSM 500

(URL: [https://www.ideal.de/preisvergleich/OfferOfProduct/201895666_-jpsm-500-juratherm.html](https://www.ideal.de/preisvergleich/OfferOfProduct/201895666_-jpsm-500-juratherm.html,), aufgerufen am: 28.12.2023)

[34] **co2online gemeinnützige Beratungsgesellschaft mbH:** Fernwärme: Technik, Nutzung,Kosten und Alternativen

(URI: [https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/heizung/fernwaerme/#:~:text=Die%20durchschnittlichen%20Fernw%C3%A4rme%20Kosten%20pro,118%2C85%20Euro%20je%20MWh.](https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/heizung/fernwaerme/#:~:text=Die%20durchschnittlichen%20Fernw%C3%A4rme%20Kosten%20pro,118%2C85%20Euro%20je%20MWh.,), aufgerufen am: 26.12.2023)

[35] **bdew 2023:** BDEW-Strompreisanalyse Dezember 2023

(URL: [https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/#:~:text=Der%20durchschnittliche%20Strompreis%20f%C3%BCr%20kleine,23%2C32%20ct%2FkWh.](https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/#:~:text=Der%20durchschnittliche%20Strompreis%20f%C3%BCr%20kleine,23%2C32%20ct%2FkWh.,), aufgerufen am: 26.12.2023)

[36] **StudySmarter GmbH:** Einführung in die Amortisationsvergleichsrechnung

(URL: [https://www.studysmarter.de/ausbildung/kaufmaennisch/finanzierung-und-investition/amortisationsvergleichsrechnung/#:~:text=Die%20Amortisationsdauer%20wird%20berechnet%2C%20indem,um%20die%20urspr%C3%BCngliche%20Investition%20zur%C3%BCckzugewinnen.](https://www.studysmarter.de/ausbildung/kaufmaennisch/finanzierung-und-investition/amortisationsvergleichsrechnung/#:~:text=Die%20Amortisationsdauer%20wird%20berechnet%2C%20indem,um%20die%20urspr%C3%BCngliche%20Investition%20zur%C3%BCckzugewinnen.,), aufgerufen am: 01.01.2024)

[37] **Vaillant Group Austria GmbH**: Was ist die Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe?

(URL: <https://www.vaillant.at/privatanwender/tipps-und-wissen/lexikon-heizung-luftung-klima/jahresarbeitszahl/#:~:text=Daher%20empfiehlt%20sich%20eine%20witterungsgef%C3%BChrte,Jahresarbeitszahl%20zwischen%203%20und%205.>, aufgerufen am: 11.01.2024)

