

Energiekonzept - Überbauung Houelbachstrasse, Kriens



Bachelorarbeit

Von

Benjamin Müller

Bachelorstudiengang 2019
Umweltingenieurwesen
Abgabedatum 12.01.2023

Fachkorrektor 1

Manuel Hunziker

Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen
Forschungsgruppe Erneuerbare Energien

Fachkorrektor 2

Dionis Anderegg

Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen
Forschungsgruppe Erneuerbare Energien

Impressum

Institut

Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen
ZHAW Life Sciences und Facility Management
Grüentalstrasse 14
8820 Wädenswil

Verfasser

Benjamin Müller

Zitiervorschlag

Müller, B. (2022). Energiekonzept - Überbauung Houelbachstrasse, Kriens. Bachelorarbeit, Bachelorstudiengang Umweltingenieurwesen, ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Wädenswil.

Titelbild

(Müller, 2022)

Zusammenfassung

In der vorliegenden Bachelorarbeit wurde ein Energiekonzept für die Überbauung an der Houelbachstrasse in 6010 Kriens erstellt. Die aktuell verbaute Gasheizung mit einer Nennleistung von 105 kW sollte durch ein erneuerbares und möglichst effizientes sowie kostengünstiges Heizsystem ersetzt werden. Das Energiekonzept sollte neben dem Heizungersatz, sofern sinnvoll, auch komplementäre Systeme wie eine Solarstromanlage oder Hybridkollektoren beinhalten. Die Überbauung umfasst 18 Eigentumswohnungen, welche sich eine zentrale Heizung teilen. Die Warmwasseraufbereitung geschieht dezentral in den einzelnen Liegenschaften. Oftmals werden dazu noch Elektroboiler verwendet. Die ganze Überbauung weist eine Energiebezugsfläche von 2'930 m² auf. Die Nutzwärmeenergie, welche von den Bewohner:innen jährlich bezogen wird, beträgt 129'504 kWh. Ausgehend von Wärmeverteilungsverlusten und dem Anlagennutzungsgrad wird von einem Endenergiebedarf von 136'320 kWh in Form von Erdgas ausgegangen. Basierend auf diesen Daten konnte die Energiekennzahl berechnet und mit Standardwerten verglichen werden. Es ergab sich eine Energiekennzahl für Raumwärme und Warmwasser von $73 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$. Dieser Wert liegt deutlich unter den in diesem Baujahr üblichen $100 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$. Somit bestand noch kein Bedarf, die Gebäude energetisch zu sanieren. Es wurde allerdings vermerkt, dass bei der Warmwasseraufbereitung noch Verbesserungspotenzial besteht, welches in einem separaten Energiesparblatt beleuchtet wird. Es wurde ebenfalls festgestellt, dass die aktuell verbaute Heizung leicht überdimensioniert wurde. Anhand der Energieverbräuche konnte die Heizleistung mittels Vollaststunden auf 65 kW geschätzt werden. Eine genauere Berechnung der Norm-Heizlast ergab eine Heizleistung von 75 kW. Da die Norm-Heizlast auch tiefste Temperaturereignisse abdeckt, wurde in der Arbeit mit der Norm-Heizlast fortgefahren. Ausgehend von der Ist-Situation wurde das Potenzial verschiedener Heizungslösungen und Energiesysteme abgeschätzt. Dabei mussten bereits erste Varianten wie zum Beispiel eine Holzfeuerung verworfen werden. Aus der Potenzialstudie wurden mehrere Varianten entwickelt, welche vertieft betrachtet werden sollten. Diese waren:

- Luft-Wärmepumpe mit Solarstromanlage
- Erdsonden-Wärmepumpe mit Hybridkollektoren und ggf. mit Solarstromanlage
- Bivalentes System aus Erdsonden-Wärmepumpe und Luft-Wärmepumpe

Die Varianten wurden in Polysun simuliert, um deren Machbarkeit zu prüfen. Ausserdem konnten so die wichtigsten Energiedaten gewonnen werden, welche in die spätere Wirtschaftlichkeitsberechnung einfließen. In dieser Phase mussten keine weiteren Varianten verworfen werden. Gemäss den Simulationen erfüllten alle Varianten die Funktionsanforderungen. Die Varianten konnten also mit echten Produkten konkretisiert werden. Daraufhin wurde eine Wirtschaftlichkeitsberechnung der Varianten erstellt. Die Wirtschaftlichkeit wurde mithilfe der Annuitätenmethode beurteilt. Es wurden die jährlichen Energie-, Kapital- sowie

Unterhalts- und Betriebskosten berechnet. Aus den jährlichen Kosten konnten die spezifischen Wärmekosten berechnet werden, welche einen weiteren Vergleichswert darstellten. Mithilfe der wirtschaftlichen Kennzahlen und den Energiekennzahlen konnten die Varianten schlussendlich verglichen und bewertet werden. Die Bewertung geschah anhand einer Nutzwertanalyse. In der Nutzwertanalyse wurden die Aspekte, Ökonomie, Ökologie und Komfort bewertet. Es wurden drei Szenarien bewertet bei welcher je ein Aspekt stärker gewertet wurde. Schlussendlich konnten die durchschnittlichen Zielerreichungsgrade der Varianten miteinander verglichen werden. Den höchsten Zielerreichungsgrad erreicht die Variante der Erdwärmesonde mit Hybridkollektoren, jedoch ohne Solarstromanlage. Sie schnitt in allen drei Szenarien am besten ab. Trotz der hohen Investitionskosten von 297'200 CHF, wurde der Eigentümerschaft die Variante Erdwärmesonde mit Hybridkollektoren empfohlen. Die Investitionen übersteigen zwar das definierte Kostendach von rund 200'000 CHF. Es handelt sich aber um die langfristig beste Variante. Die Bewohner:innen profitieren mit diesem System von Nebenkosteneinsparungen in der Höhe von rund 900 CHF. Ausserdem kann das System mit einer Solarstromanlage erweitert werden, welche die Nebenkosten weiter reduziert. Die gestaffelte Umsetzung bringt zusätzliche Steuererleichterung. Auch aus ökologischer Sicht überzeugt die Variante. Die CO₂-Emissionen im Betrieb könnten um rund 71 % reduziert werden. Dies entspricht knapp 28 Tonnen CO₂ pro Jahr. Ausserdem verursacht die Variante weder Lärmbelastungen im Aussenbereich noch müssen Heizungskomponenten im Aussenbereich installiert werden wo sie störend auf die Anwohner:innen wirken. Die so vorgeschlagenen Variante wird für die Eigentümerschaft mit Sicherheit ein zufriedenstellendes Projekt ergeben.

Abstract

In this bachelor thesis, an energy concept for the building on Houelbachstrasse in 6010 Kriens was developed. The current gas heating system with a nominal output of 105 kW was to be replaced by a renewable, efficient, and cost-effective heating system. In addition to the heating system replacement, the energy concept should also include complementary systems such as a solar power system or hybrid collectors, if appropriate. The development comprises 18 condominiums, which share a central heating system. The water heating is decentralized in the individual properties. Often electric boilers are used for this purpose. The entire development has an energy reference area of 2,930 m². The useful heat energy, which is used by the residents, amounts to 129'504 kWh per year. Based on heat distribution losses and the system efficiency, a final energy demand of 136,320 kWh in the form of natural gas is assumed. Based on this data, the energy index could be calculated and compared with standard values. This resulted in an energy index for space heating and hot water of $74 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$. This value is well below the $100 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ standard for this year of construction. Thus, there was not yet a need to renovate the buildings for energy efficiency. It was noted, however, that there was still potential for improvement in hot water preparation, which will be highlighted in a separate energy savings sheet. It was also noted that the currently installed heating system was slightly oversized. Based on the energy consumption, the heating capacity could be estimated at 65 kW by means of full load hours. A more precise calculation of the standard heating load resulted in a heating capacity of 75 kW. Since the standard heating load also covers the lowest temperature events, the work continued with the standard heating load. Based on the actual situation, the potential of different heating solutions and energy systems was estimated. In the process, the first variants, such as a wood-fired system, had to be discarded. From the potential study, four variants were developed, which were to be considered in more detail. These were:

- Air-source heat pump with solar power system
- Ground-source heat pump with hybrid collectors with or without solar power system
- Bivalent system of ground-source heat pump and air-source heat pump

The variants were simulated in Polysun to check their feasibility. In addition, the most important energy data could be obtained, which were used in the later profitability calculation. No further variants had to be discarded in this phase. According to the simulations, all variants met the functional requirements. The variants could therefore be concretized with real products. A profitability calculation of the variants was then prepared. The economic efficiency was assessed using the annuity method. The annual energy, capital, maintenance and operating costs were calculated. From the annual costs, the specific heating costs could be calculated, which represented a further comparative value. With the help of the economic key figures and the energy key figures, the variants could finally be compared and evaluated. The evaluation was based on a utility value analysis. In the utility value analysis, the aspects of economy, ecology and comfort were evaluated. Three scenarios were evaluated in which one aspect was given greater weight.

Finally, the average degrees of target achievement of the variants could be compared with each other. The highest degree of target achievement was achieved by the geothermal probe variant with hybrid collectors, but without a solar power system. It performed best in all three scenarios. Despite the high investment costs of 297,200 CHF, the owner was recommended the geothermal probe variant with hybrid collectors. The investment exceeds the defined cost ceiling of about 200,000 CHF. However, this is the best variant in the long term. With this system, the residents benefit from utility cost savings of around 900 CHF. In addition, the system can be expanded with a solar power system, which further reduces the ancillary costs. The staggered implementation brings additional tax relief. The variant is also convincing from an ecological point of view. CO₂-emissions during operation could be reduced by around 71%. This corresponds to just under twenty-eight tons of CO₂ per year. In addition, the variant causes neither noise pollution in the outdoor area nor do heating components have to be installed in the outdoor area where they have a disturbing effect on the residents: inside. The variant proposed in this way will certainly result in a satisfactory project for the owners.

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	VII
1 EINLEITUNG	8
2 STRATEGISCHE PLANUNG	8
2.1 ZIELE UND RAHMENBEDINGUNGEN	8
2.2 IST SITUATIONSANALYSE.....	10
2.3 HEIZWÄRMEBEDARF UND -BEREITSTELLUNG.....	11
3 VORSTUDIE - POTENZIALANALYSE	18
3.1 LÖSUNGSVARIANTEN WÄRMEERZEUGUNG	18
3.2 LÖSUNGSVARIANTEN ELEKTRISCHE ENERGIEERZEUGUNG.....	27
3.3 LÖSUNGSVARIANTEN ENERGIESPEICHER	29
3.4 LÖSUNGSVORSCHLÄGE ENERGIEEFFIZIENZ.....	31
3.5 FAZIT	33
4 VORPROJEKT - VARIANTEN AUSARBEITUNG	36
4.1 REFERENZMODELL	36
4.2 LUFT-WASSER WÄRMEPUMPE UND REINE STROMERZEUGUNGSANLAGE	39
4.3 SOLE-WASSER WÄRMEPUMPE MIT HYBRIDKOLLEKTOREN UND EINER PHOTOVOLTAIKANLAGE	41
4.4 SOLE-WASSER WÄRMEPUMPE MIT HYBRIDKOLLEKTOREN	43
4.5 BIVALENTES SYSTEM - EWS UND LUFT-WASSER WÄRMEPUMPE	45
4.6 FAZIT	46
5 VORPROJEKT – KONKRETISIERUNG	49
5.1 LUFT- WASSER WÄRMEPUMPE	49
5.2 SOLE – WASSER WÄRMEPUMPE MIT PVT-KOLLEKTOREN.....	51
5.3 BIVALENTES SYSTEM - EWS UND LUFT-WASSER WÄRMEPUMPE	51
6 VORPROJEKT – WIRTSCHAFTLICHKEITSBERECHNUNG	52
6.1 BEGRIFFSERKLÄRUNG	53
6.2 LUFT-WÄRMEPUMPE MIT PV	54
6.3 EWS MIT PVT UND PV	56
6.4 EWS MIT PVT	58
6.5 BIVALENT.....	60
6.6 SOLARSTROMANLAGE 75 kWp	62
6.7 SOLARSTROMANLAGE 50 kWp	63
7 VORPROJEKT – VARIANTEN BEWERTUNG	64
7.1 AUFBAU DER NUTZWERTANALYSE	64
7.2 GEWICHTUNGEN DER NUTZWERTANALYSE.....	65

7.3	RESULTATE DER NUTZWERTANALYSE	66
8	EMPFEHLUNGEN VARIANTENENTSCHEID.....	70
8.1	RESULTATE WIRTSCHAFTLICHE BETRACHTUNG	70
8.2	RESULTATE ÖKOLOGISCHE BETRACHTUNG.....	71
8.3	RESULTATE KOMFORT UND BENUTZERFREUNDLICHKEIT	73
8.4	ABSCHLIESSENDE EMPFEHLUNG.....	74
9	DISKUSSION	75
9.1	ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE	75
9.2	INTERPRETATION DER ERGEBNISSE	77
9.3	ERFAHRUNGEN AUS DER PRAXIS	78
9.4	UNSICHERHEITEN UND GRENZEN DER ARBEIT	79
10	FAZIT.....	80
11	LITERATURVERZEICHNIS.....	LXXXI
12	TABELLENVERZEICHNIS	LXXXIV
13	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	LXXXV

Abkürzungsverzeichnis

B

BFE *Bundesamt für Energie*

C

COP *Coefficient of Performance*

E

EBF *Energiebezugsfläche*

EMS *Energiemanagementsystem*

ewl *Energie Wasser Luzern*

EWS *Erdwärmesonden*

J

JAZ *Jahresarbeitszahl, Jahresarbeitszahl*

K

kWp *kilo Watt peak*

L

LW *Luft-Wasser*

M

MuKen *Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich*

W

Wp *Watt peak*

1 Einleitung

In der vorliegenden Bachelorarbeit wurde ein Energiekonzept für die Eigentumswohnungssiedlung an der Houelbachstrasse in Kriens erstellt. Die Wohnsiedlung muss bald ihr bestehendes fossiles Heizungssystem ersetzen. Aktuell ist eine kondensierende Gasheizung mit einer thermischen Leistung von 105 kW installiert. Die Heizung soll durch ein erneuerbares Heizsystem ersetzt werden. Um die Eigentümerschaft bei diesem Vorhaben zu unterstützen, wurden in dieser Arbeit mehrere Energiekonzepte erarbeitet und miteinander verglichen. Als Endprodukt liegt der Eigentümerschaft eine Entscheidungsgrundlage vor mit welcher Sie Ihren Heizungsersatz durchführen kann.

Ziel dieser Arbeit war es ein stimmiges Energiekonzept für die drei Gebäude an der Houelbachstrasse zu entwickeln. In diesen Energiekonzepten sollen auch komplementäre Systeme behandelt werden. Unter komplementären Systemen wurden beispielweise eine Regeneration der Erdwärmesonden verstanden. Aber auch Steuerungsoptimierungen der Wärmeerzeugungsanlage wurden in Betracht gezogen. Aufgrund der Erarbeiteten Konzepte sollten Empfehlungen an die Eigentümer der Wohnsiedlungen abgegeben werden. Diese Empfehlungen sollten als Entscheidungsgrundlage für den Heizungsersatz sowie weitere Massnahmen zur Erneuerung der Gebäude dienen.

2 Strategische Planung

In dieser Phase wurden die Ziele und Rahmenbedingungen für das Energiekonzept definiert. Dabei wurden die Bedürfnisse der Auftraggeber erfasst und mit den Bedingungen am Standort gegenübergestellt. Aus den so gewonnen Erkenntnissen konnten erste Lösungsstrategien entworfen werden, welche in den folgenden Phasen weiter vertieft werden.

2.1 Ziele und Rahmenbedingungen

In der vorliegenden Bachelorarbeit soll ein Energiekonzept erstellt werden welches zum einen die Bedürfnisse der Anwohner und der Auftraggeber erfüllt. Diese sind zum einen technischer Natur aber auch ökonomischer und ökologischer Natur.

2.1.1 Technische Rahmenbedingungen

Als technische Rahmenbedingungen wurden die folgenden Punkte definiert.

- Das neue Heizsystem muss so dimensioniert sein, dass es den aktuellen und zukünftigen Energiebedarf decken kann.
- Das neue Heizsystem soll den Energiebedarf möglichst effizient und ressourcenoptimiert decken können.
- Das neue Heizsystem muss so weit wie möglich im bestehenden Heizungsraum realisiert werden.
- Können nicht alle Komponenten der neuen Heizung im Heizungsraum untergebracht werden, so ist die Heizung so zu planen, dass die aussenstehenden Komponenten so wenig Platz wie möglich einnehmen.
- Es dürfen keine zusätzlichen Bauten erstellt werden

2.1.2 Ökonomische Rahmenbedingungen

Der Ersatz des Heizungssystems ist noch nicht dringend erforderlich. Somit besteht für die Eigentümerschaft noch Gelegenheit die Finanzierung eines anstehenden Heizungsersatzes zu planen. Als Kostendach wurden Investitionen in der Höhe von rund 200'000 CHF genannt. Sollte dieses Kostendach überschritten werden so sollte darauf geachtet werden, dass das Projekt gestaffelt realisiert, werden kann sodass nicht alle Kosten auf einmal anfallen.

Unter diesen Rahmenbedingungen wurden Energiekonzepte entworfen, welche den Anforderungen entsprechen.

Neben der Höhe der Investitionskosten sind aber auch die Betriebs- und Unterhaltskosten entscheidend. Das Energiekonzept darf nicht zu höheren Nebenkosten für die Bewohner: innen führen. Diese beiden Parameter, Investitionskosten und Betriebs- und Unterhaltskosten sollen in die Bewertung der Varianten mit einfließen.

2.1.3 Ökologische Rahmenbedingungen

Der Auftraggeber will, dass lediglich erneuerbare Heizungssysteme in Betracht gezogen werden. Ein neues Heizsystem soll ausserdem möglichst geringe CO₂-Emissionen verursachen und dabei wertvolle Ressourcen wie Holz oder Elektrizität gar nicht oder nur in möglichst geringem Masse verwenden. Tatsächlich zählen auch Holzfeuerungen zu den erneuerbaren Heizsystemen. Im weitesten Sinne ist dies auch korrekt. Allerdings müssen für die Gewinnung des Brennstoffes grosse Aufwände betrieben werden, sodass der ganze Prozess keineswegs CO₂-neutral ist. Ausserdem besteht bereits heute ein grosser Druck auf die einheimischen Waldbestände. Dieser wird durch die steigende Nachfrage nach inländischem Holz, sei dies in der Bau- oder Chemiebranche, deutlich zunehmen. Holzfeuerungen sollten nicht bereits in vornherein

verworfen werden. Unter den genannten Gesichtspunkten wird es allerdings schwierig eine Holzfeuerung zu empfehlen.

2.2 Ist Situationsanalyse

Nachfolgend wurden die zu untersuchenden Liegenschaften analysiert. Aus dieser Ist-Situationsanalyse lassen sich wichtige Schlüsse ziehen, welche zukünftige Massnahmen beeinflussen. Anhand der Ist-Situationsanalyse könnte sich herausstellen, dass die Liegenschaften zuerst saniert werden müssen bevor über einen Heizungsersatz nachgedacht werden kann. Es könnte aber auch sein, dass Heizungsvarianten bereits zu diesem Zeitpunkt verworfen werden können. Zum Beispiel die Nutzung der Erdwärme, sofern im untersuchten Gebiet keine Erdwärmenutzung erlaubt ist.

2.2.1 Perimeter

Die Siedlung an der Houelbachstrasse besteht aus 18 Eigentumswohnungen. Jeweils 6 dieser Wohnungen wurden zu einem Gebäude zusammengefasst und teilen sich ein Dach. So entstehen 3 Gebäude und drei verfügbare Dachflächen. Auf der folgenden Abbildung 1 ist der zu untersuchende Perimeter zusehen. Der Untersuchungsperimeter (rot markiert) erstreckt sich über die Parzellen 5611 bis hin zu 5628. Ausserdem gehört die Parzelle 5529 dazu, welche den ganzen Umschwung um die drei Gebäude umfasst.



Abbildung 1: Untersuchungsperimeter an der Houelbachstrasse in 6010 Kriens mit den eingezeichneten Parzellen

2.3 Heizwärmebedarf und -bereitstellung

Der Heizungsraum befindet sich im Untergeschoss der Parzelle 5616 (Blau markiert in der Abbildung 1). Von dort wird mithilfe von Vor- und Rücklaufleitungen die Wärme an die restlichen Gebäude abgegeben. Diese Vor- und Rücklaufleitungen sind erdverlegt und verlaufen in einer Tiefe von rund 1.5 Metern durch das Grundstück hin zu den einzelnen Gebäuden.

Der Heizungsraum hat eine Grösse von rund 28 m² und wird im Moment noch als Lagerstätte für private Gegenstände, wie in Abbildung 2 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ersichtlich, verwendet. Er weist eine Länge von rund 5.5 Metern und eine Breite von etwa 5 Metern auf. Die Raumhöhe beträgt 2.2 Meter.



Abbildung 2: Einblick in den Heizungsraum inkl. den privaten Gegenständen

Werden diese weggeräumt oder zumindest geordnet gelagert könnte der Heizungsraum sensiblen oder anderen Speichern Platz bieten.

Die Wärme wird aktuell von einer 105 kW Gasheizung bereitgestellt. Es gilt zu beachten, dass die Wärme, welche von der Gasheizung zur Verfügung gestellt wird, lediglich zu Heizwecken dient. Für die Aufbereitung des Trinkwarmwassers sind die Anwohner selbst verantwortlich. Somit beziehen sich die nachfolgenden Energiekennzahlen lediglich auf die Heizwärme.

Zwischen den Eigentumswohnungen gibt es eine grosse Spannweite zwischen den Wärmebedarfen. Der Wärmeenergiebedarf liegt zwischen rund 3'700 kWh und 13'700 kWh pro Wohnung. Der durchschnittliche Wärmeenergiebedarf liegt bei 129'504 kWh pro Jahr. Bei diesem Wert handelt es sich allerdings um den Nutzenergiebedarf, welcher bei den Bewohnern anhand von Wärmehählern gemessen wurde. Es muss noch mit Wärmeverteilverlusten im Verteilsystem gerechnet werden. Der Effektive Jahresenergieverbrauch in Form von Erdgas muss höher sein.

Ausgehend von einer modernen kondensierenden Gasheizung kann von einem Nutzungsgrad von rund 95 % ausgegangen werden. In diesem Fall läge der jährliche Energiebedarf bei 136'320 kWh.

2.3.1 Heizungsdimensionierung

In Anbetracht des oben beschriebenen Energiebedarfs, scheint die zurzeit installierte Heizung massiv überdimensioniert zu sein. Ausgehend vom Nutzenergiebedarf von 129'504 kWh pro Jahr lässt sich die ungefähr benötigte Leistung anhand der Vollaststunden berechnen. Da die Warmwasseraufbereitung nicht über die Heizung geschieht wird von rund 2000 Vollaststunden ausgegangen. Somit müsste das aktuelle Heizsystem eine Heizleistung von 65 kW aufweisen, um den Energiebedarf zu decken. Bedeutend weniger als zurzeit installiert ist. Eine Überschlagsmässige Simulation in Polysun hat ergeben, dass eine moderne Gasheizung den Gebäudeenergiebedarf selbst mit einer installierten Leistung von 60 kW decken kann. Die Dimensionierung der Heizungsanlage muss also überdacht werden. So können bei der geplanten Umsetzung des Energiekonzepts Investitionskosten gespart werden.

2.3.2 Gebäudephysikalische Beurteilung der Liegenschaften

Die Gebäude mit Baujahr 2000 befinden sich in einem guten Zustand. Bei den Fassaden handelt es sich laut Aussagen Auftraggeberschaft um ein Doppelschalenmauerwerk mit einer Dämmung aus PUR Matten mit einer Stärke von 12 cm. Das Dach wurde mit einer Schicht aus 20 cm starker Steinwolle gedämmt. Gemäss dem Online Tool «ubakus» ergibt sich so ein U-Wert für die Fassade von $0.2 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ (Ubakus, 2022b) und für das Dach $0.21 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ (Ubakus, 2022a). Für die Fenster wurde ein Standard-Wert von $1.2 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ angenommen. Dabei handelt es sich um ein gutes Zweischeiben-Wärmeschutzverglastes Fenster aus dem Jahr 2000.

Aufgrund dieser Angaben wird die Qualität der Gebäudehülle als gut eingeschätzt. Es gibt allerdings einige Schwachstellen wie zum Beispiel die Wärmebrücken an den Balkonen oberhalb der Küchen. Diese zu ersetzen wäre allerdings mit grossen Aufwänden verbunden. Auch eine Verbesserung der Gebäudehülle sei dies durch eine zusätzliche Wärmedämmung der Fassade oder ein Ersatz der Fenster könnte die Qualität der Gebäudehülle weiter verbessern. Der Ersatz der Fenster obliegt allerdings jedem Eigentümer und jeder Eigentümerin selbst. Somit können solche Massnahmen nur schwer in das Konzept integriert werden. Die Fenster nähern sich bald dem Ende Ihrer Lebensdauer und sollten ersetzt werden (Mieter:innen- und Hauseigentümer:innen Verband Schweiz, 2019).

Neben der Beschaffenheit der Gebäudehülle ist auch die Tragfähigkeit des Daches entscheidend. Besonders wenn in die entwickelten Energiekonzepte noch eine Solarstrom oder Solarwärmanlage integriert werden soll. Aufgrund eines Wasserschadens im Jahr 2021 wurde

die Dächer kontrolliert und sind nach Aussagen der Eigentümerschaft und der Auftraggeberschaft für Photovoltaikanlage geeignet. Dies lässt sich auch daran erkennen, dass bereits eine Solarstromanlage realisiert wurde.

2.3.3 Energetische Beurteilung der Liegenschaften

Die 18 Eigentumswohnungen an der Houelbachstrasse weisen eine Energiebezugsfläche von rund 2'930 m² auf. Zur Berechnung der Energiebezugsfläche oder kurz EBF wurden die Baupläne einer einzelnen Partei verwendet. Es wurde dann davon ausgegangen, dass sich die Räumlichkeiten der restlichen Wohnungen nicht von den Referenzplänen unterscheiden.

Bei einer Energiebezugsfläche oder EBF von 2'930 m² ergibt sich so eine Energiekennzahl von $47 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$. Diese Energiekennzahl bezieht sich lediglich auf die Raumwärme. Die Energie, welche von den Bewohnern für die Aufbereitung des Brauchwarmwassers verwendet wird, konnte nicht genau erfasst, nur angenommen werden. Es wurde angenommen, dass es sich jeweils um einen 4 Personen Haushalt handelt, der sein Brauchwarmwasser mittels Elektroboiler bereitstellt. So ergibt sich ein Energiebedarf von 4'258 kWh pro Haushalt pro Jahr was einer Energiekennzahl von rund $26 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ entspricht. Die Gesamte Energiekennzahl der Siedlung liegt somit bei $73 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$.

Zum Vergleich bietet das Geoportal des Kanton Luzern eine Karte mit den Energiekennzahlen an. Darin wird der Perimeter an der Houelbachstrasse sowie einige Umliegende Gebäude auf eine Energiekennzahl von $79 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ geschätzt (Luzern, 2022). Somit deckt sich die eigens berechnete Energiekennzahl sehr gut mit der Energiekennzahl des Kantons und scheint deshalb realistisch.

Die Gebäude wurden ungefähr im Jahr 2000 erbaut. In dieser Bauperiode wurden gemäss einer Studie des Amtes für Umwelt und Energie des Kantons Luzern die Energiekennzahlen der Gebäude für Heizwärme und Warmwasser auf rund $100 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ geschätzt (Kanton Luzern, 2015). Somit stehen die Gebäude an der Houelbachstrasse mit einer ungefähren Energiekennzahl von $73 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ für den damaligen Baustandard sehr gut da. Verglichen mit den heutigen Grenzwerten können die Liegenschaften der Überbauung allerdings nicht mithalten. Gemäss den neusten Grenzwerten der MuKen oder Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich Einfamilienhäuser einen Grenzwert von $31 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ einhalten (Konferenz kantonaler Energiefachstellen, 2016). Durch die Erneuerung der Heizung durch beispielsweise eine Wärmepumpe mit hoher Jahresarbeitszahl oder dem Ersatz der Elektroboiler kann die eigene Energiekennzahl dem Grenzwert der MuKen angeglichen werden. Ausserdem gibt es weiteres Sanierungspotenzial auf, welches im Laufe dieser Arbeit eingegangen werden soll. Darin enthalten sind beispielsweise kleine einfache Massnahmen wie das Ersetzen von Umwälzpumpen.

2.3.4 Norm-Heizlast

Die Norm-Heizlast gibt an, welche Heizleistung erbracht werden muss, um einen Raum oder ein Gebäude am kältesten Tag bei einer konstanten Soll-Temperatur zu halten. Sie setzt sich aus den Transmissionsverlusten und den Lüftungsverlusten zusammen. Zur Berechnung der Norm Heizlast wurde auf die Baupläne der einzelnen Wohnungen sowie die ermittelten U-Werte der Gebäudehülle zurückgegriffen. Die Soll Raumtemperatur wurde gemäss der SIA384_201 (Schweizerischer Ingenieur- und & Architektenverein, 2005) bei 20 °C angenommen. Die Norm-Heizlast wird wie folgt berechnet:

$$\theta_i = \theta_{T,i} + \theta_{V,i}$$

θ_i = Norm-Heizlast

$\theta_{T,i}$ = Transmissionsverluste

$\theta_{V,i}$ = Lüftungsverluste

Die Transmissionsverluste setzen sich aus den Verlusten durch die Fassade sowie durch die Fenster zusammen.

$$\theta_{T,i} = H_{T,iue} + H_{T,ie}$$

$\theta_{T,i}$ = Transmissionsverluste

$H_{T,iue}$ = Verluste durch Fenster

$H_{T,ie}$ = Verluste durch die Gebäudehülle

Für die beiden Komponenten, Verluste durch Fenster sowie Verluste durch die Fassade gelten dieselben Formeln. Nachfolgend ist die Formel für die Verluste durch die Fenster dargestellt. Für die Verluste durch die Fassade wird lediglich die Fläche der Fassade sowie deren u-Wert eingefügt.

$$H_{T,iue} = A_F * U_F * (\theta_{int,i} - \theta_e)$$

$H_{T,iue}$ = Verluste durch Fenster

A_F = Fläche Fenster

U_F = U – Wert Fenster

$\theta_{int,i}$ = Norm Innentemperatur

θ_e = Norm Aussentempereratur

Die Norm- Innentemperatur, $\theta_{int,i}$ wurde gemäss der SIA 384.203 als 20 °C angenommen (Schweizerischer Ingenieur- und & Architektenverein, 2005). Die Norm-Aussentemperatur wurde aus den lokalen Meteodaten gewonnen. Diese beträgt in der Umgebung von Luzern (-8 °C) (Meteoswiss, 2022). Die Transmissionswärmeverluste wurden wie folgt berechnet. Flächen für die Fenster oder Fassaden aber auch die Raumhöhe wurden den zur Verfügung gestellten Bauplänen entnommen.

Verluste durch die Fassade

$$H_{T,ie} = A_{Fas} * U_{Fas} * \Delta T$$

$$H_{T,ie} = 2'062.2 \text{ m}^2 * 0.2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{K}} * (20 \text{ }^\circ\text{C} - (-8 \text{ }^\circ\text{C}))$$

$$H_{T,ie} = 11'548 \text{ W} = 11.5 \text{ kW}$$

Verluste durch Fenster

$$H_{T,iue} = A_{Fenster} * U_{Fenster} * \Delta T$$

$$H_{T,iue} = 604 \text{ m}^2 * 1.2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{K}} * (20 \text{ }^\circ\text{C} - (-8 \text{ }^\circ\text{C}))$$

$$H_{T,iue} = 2'0294 \text{ W} = 20.3 \text{ kW}$$

Aus den beiden Verlustleistungen lässt sich nun das Total der Transmissionswärmeverluste berechnet werden. Somit belaufen sich die Transmissionsverluste für Fenster $H_{T,iue}$ und für die Gebäudehülle $H_{T,ie}$ auf rund 32 kW

Neben den Transmissionsverlusten müssen auch noch die Lüftungswärmeverluste berechnet werden. Sie sind abhängig davon, wie dicht das Gebäude gebaut wurde und wie oft die Luft im Raum durch natürliche Luftwechsel ausgetauscht wird. Zur Luftwechselrate bietet die SIA normierte Werte für die Berechnung an. Die Lüftungswärmeverluste berechnen sich wie folgt:

$$\theta_{V,i} = \dot{V} * \rho_{Luft} * c_{p,Luft} * \Delta T$$

$$\theta_{V,i} = V_{Gebäude} * n_{Luftwechsel} * \rho_{Luft} * c_{p,Luft} * \Delta T$$

$\theta_{V,i}$ = Lüftungswärmeverluste

ΔT = Temperaturdifferenz Norm Innen und Aussentemperatur

\dot{V} = Luftvolumenstrom

ρ_{Luft} = Dichte der Luft

$c_{p,Luft}$ = Wärmekapazität der Luft

$V_{Gebäude}$ = Volumen des Gebäudes

$n_{Luftwechsel}$ = Luftwechselrate gemäss SIA

Um die Lüftungswärmeverluste zu berechnen, musste eine Annahme zu der Luftwechselrate $n_{Luftwechsel}$ getroffen werden. Es wurde angenommen, dass die Luft innerhalb der Gebäude einmal alle 2 Stunden oder 0,5-mal pro Stunde ausgetauscht wird. Gemäss der SIA-Norm darf der Ausdruck $(\rho_{Luft} * c_{p,Luft})$ auch durch $0.34 \frac{Wh}{m^3 * K}$ vereinfacht werden (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2005). Die Raumhöhe von 2.4 m wurde den Bauplänen entnommen. Somit ergeben sich die folgenden Lüftungswärmeverluste:

$$\theta_{V,i} = 8'414 \text{ m}^3 * 0.5 \frac{1}{h} * 0.34 \frac{Wh}{m^3 * K} * (20 \text{ }^\circ\text{C} - (-8 \text{ }^\circ\text{C}))$$

$$\theta_{V,i} = 40'051 \text{ W} = 40 \text{ kW}$$

Aus den beiden Wärmeverlusten durch die Gebäudehülle und die Lüftung lässt sich nun die Norm-Heizlast berechnen. Die Norm-Heizlast, welche eine Heizung minimal erbringen muss, beträgt gemäss der SIA also 72 kW. Dieser Wert wird für die folgende Arbeit auf 75 kW gerundet.

2.3.5 Fazit Ist-Situation

Die Gebäude an der Houelbachstrasse in Kriens befinden sich verglichen mit Gebäuden aus der gleichen Bauperiode in einem sehr guten Zustand. Die Energiekennzahl liegt mit den geschätzten $73 \frac{kWh}{m^2 * a}$ deutlich unter den Werten von vergleichbaren Gebäuden in derselben Bauperiode. Für heutige Verhältnisse schneidet die Überbauung allerdings eher unterdurchschnittlich ab. Die Energiekennzahl kann allerdings bereits durch den Ersatz von Elektroboiler deutlich gesenkt werden. Durch den grossflächigen Einsatz von Wärmepumpenboilern könnte die Energiekennzahl von $26 \frac{kWh}{m^2 * a}$ für Warmwasser auf rund $7 \frac{kWh}{m^2 * a}$ gesenkt werden. Auf dieselbe Art und Weise kann auch die Energiekennzahl für Raumwärme reduziert werden. Auch hier muss eine Wärmepumpe mit einer hohen Jahresarbeitszahl verwendet werden. Weitere Massnahmen zur Reduktion der Energiekennzahl sind die Sanierungen von Fenstern, Fassaden oder wärmebrücken. Diese werden in dieser Arbeit aber nicht bearbeitet.

Die derzeit installierte Heizung ist etwas überdimensioniert. Überschlagsmässig konnte die benötigte Heizleistung auf rund 65 kW geschätzt werden. Eine genauere Berechnung der Norm-Heizlast mittels der SIA-Norm 384.203 ergab eine minimale Heizleistung von 72 kW. Für die Arbeit wurde der Wert aber auf 75 kW gerundet. Die 10 kW Differenz zwischen der überschlagsmässigen Rechnung und der Berechnung gemäss der SIA kommen nicht von irgendwo her. Grundsätzlich ist es möglich ein Heizungssystem nur anhand der Energieverbräuche und der Vollaststunden zu dimensionieren. So ergibt sich eine Heizleistung, welche auf tatsächlich gemessenen Daten basiert. Die Berechnung der Norm-Heizlast ist ein rechnerischer Wert. Diese Art der Dimensionierung zielt darauf ab, die Soll-Raumwärme auch bei tiefsten Temperaturen, also «Worst-Case» Szenarien aufrecht zu erhalten. Aus diesem Grund ist diese Heizleistung oftmals bedeutend höher als die Dimensionierung anhand der Verbräuche.

Beide Arten der Dimensionierung sind gültig. Da aber die Norm-Heizlast auch tiefste Temperaturen abdeckt wird in dieser Arbeit mit der berechneten Norm-Heizlast fortgefahren.

Dem Ersatz der derzeit installierten Gasheizung steht nichts im Weg. Der Heizungsraum ist gross genug, um einer neuen Heizungsanlage inklusive technischer Speicher aufzunehmen. Einzig der Umschwung der Liegenschaften ist etwas klein. Besonders wenn eine Lösung mittels Erdsonden-Wärmepumpen angestrebt wird, muss bei der Platzierung der Sonden auch die zwischen den Häusern liegende Tiefgarage bedacht werden.

Bei der Bereitstellung des Brauchwarmwasser gibt es noch Optimierungspotenzial. Hier könnten die Elektroboiler durch Wärmepumpenboiler ersetzt werden, um Energiebedarf drastisch zu senken. Aber auch durch weitere Massnahmen wie das Ersetzen von Umwälzpumpen könnte Energie gespart werden. Die Gebäude nähern sich Ihrem 25. Lebensjahr in der gemäss dem Mieterinnen und Mieterverband die ersten Komponenten ersetzt werden sollten. Beispielsweise die Fenster. Solche Massnahmen liegen aber in der Hand der einzelnen Eigentümer. Dennoch ist es Wert solch werterhaltende Massnahmen zu erwähnen.

Zudem wurden die Dächer im Jahr 2021 in Folge eines Wasserschadens kontrolliert. Dabei wurde festgestellt, dass die Dächer auch für eine Photovoltaikanlage oder eine Solarthermieanlage geeignet wären. Somit kann auch die Produktion von Solarstrom oder Solarwärme in die Energiekonzepte einfließen.

3 Vorstudie - Potenzialanalyse

Zur Erarbeitung des Energiekonzeptes sollen in der Vorstudie verschiedene Lösungsstrategien welche sinnvoll verfolgt werden können diskutiert. Darauf aufbauend werden deren Machbarkeit und deren Erfüllung der oben genannten Ziele und Rahmenbedingungen kontrolliert werden.

3.1 Lösungsvarianten Wärmeerzeugung

In den folgenden Kapiteln werden die möglichen Lösungsvorschläge grob abgeschätzt und diskutiert. Am Ende sollen die Vor- und Nachteile der verschiedenen Varianten diskutiert werden sowie eine Entscheidung über den weiteren Verlauf der Arbeit getroffen werden.

3.1.1 Holz-Pellet-Heizung

In diesem Kapitel soll abgeklärt werden, ob eine Holzfeuerungsanlage ökologisch und ökonomisch betrieben werden könnte. Dies für den Fall, dass eine Elektrifizierung der Heizungsanlage nicht möglich ist.

Mit dem aktuellen durchschnittlichen Nutzenergieverbrauch von 129'504 kWh und einem Heizwert von 5 kWh/kg für die Holzpellets würden rund 29 Tonnen Holz-Pellets pro Jahr benötigt (Hegele, 2021). Diese 29 Tonnen Pellets müssten an Lager genommen werden. Bei einer solchen Holzfeuerung ist es nicht sinnvoll oder praktisch den gesamten Jahresbedarf an Lager zuzunehmen. Dennoch sollte die Anzahl der Lieferungen möglichst geringgehalten werden.

Für die 29 Tonnen wäre ein Lagervolumen von 48 m³ notwendig. Ausgehend von einer Schüttdichte von 600 kg/m³. Der Heizungsraum hat ein Volumen von rund 60 m³. Allerdings muss dieses Volumen reduziert werden um den Brenner sowie einige technische Hindernisse wie Rohrleitungen und anderes zu berücksichtigen. Schlussendlich wird der Heizungsraum auch als Lagerstätte für Besitztümer der Anwohner verwendet. Wird der Platz geräumt so könnte vermutlich eine Lagerstätte für rund 10 m³ Holz-Pellets eingerichtet werden. Die Lagerstätte ist per Schlauch von der Strasse aus erreichbar, was das Befüllen der Lagerstätte mittels Tankwagen ermöglicht. Bei einer maximalen Speicherkapazität von 10 m³ oder 6000 kg Pellets müsste das Lager fünfmal pro Heizperiode aufgefüllt werden.

Die Pellets könnten dabei bei der Firma «Bürli Pellets AG» in Alberswil bestellt werden. Somit müssten die Pellets lediglich eine Strecke von 31 km zurücklegen (Bürli Pellets AG, 2022). Bei 5 Lieferungen pro Heizperiode entspricht dies einer gesamten Strecke von 310 km. Auf dieser Strecke entstehen CO₂-Emissionen, welche nicht durch das Wachstum des Holzes kompensiert wurden. Eine Lieferung von jeweils 5.8 Tonnen pro Fahrt entspricht einer Belastung von 360 Tonnenkilometern. Ein LKW verursacht rund 0.171 kg CO₂-eq pro tkm. Somit belastete eine Fahrt die Umwelt mit 62 kg CO₂. Für das ganze Jahr entspricht dies 310 kg CO₂. Um also CO₂-neutral zu heizen, müssten auch diese CO₂-Emissionen sowie die CO₂-Emissionen für die

Bereitstellung des Brennstoffes kompensiert werden (Treeze, 2022). CO₂-Emissionen und die Lagerhaltung sind nicht die einzigen Aspekte, welche gegen eine Holzfeuerung sprechen. Neben der Befüllung der Lagerstätte müsste von den Anwohnern auch die Entsorgung der Asche organisiert werden. Dies ist ein weiterer Kostenpunkt und ausserdem erfordert es eine gewisse Verantwortungsübernahme der Anwohner. Verglichen mit der aktuellen Gasheizung müssten sich die Bewohner auch um die Bestellung des Brennstoffes kümmern. Auch die Wartung der Anlage ist deutlich aufwändiger. Wie bisher muss der Kaminfeger vorbeikommen, um die Abgasanlage zu prüfen. Hinzukommt aber auch der Unterhalt der automatischen Zuführung. Dies ist ein komplexes mechanisches Bauteil welches gut gewartet und unterhalten werden muss. Die Beheizung der Siedlung mittels einer Holz-Heizung wäre also durchaus denkbar ist aber mit grossem Aufwand verbunden. Neben den bereits genannten Komforteinbussen durch den Betrieb der Anlage entstehen durch die Verbrennung von Holz auch Folgen für die menschliche Gesundheit. Durch die Holzverbrennung gelangen trotz modernster Filtertechnologien Russ und Feinstaubpartikel in die Luft. Besonders die kleinsten Feinstaubpartikel sind lungengängig und können da zu gesundheitlichen Schäden an Mensch und Umwelt ausüben (UFAM, 2021). Da städtische Gebiete ohnehin bereits stark von Feinstaub belastet sind sollte von einer zusätzlichen Feinstaubquelle als Heizsystem abgesehen werden.

3.1.2 Sole-Wasser Wärmepumpe

Die Energie für die Raumwärme sowie die Warmwasseraufbereitung kann auch mittels einer Erdwärme-Wärmepumpe bereitgestellt werden. Eine solche Lösung ist aber nicht überall zulässig. Um abzuklären, ob die Nutzung der Erdwärme an der Houelbachstrasse erlaubt ist, muss der kantonale Geo Katalog betrachtet werden. In diesem werden Gebiete in denen Erdwärmesonden erlaubt sind ausgewiesen.

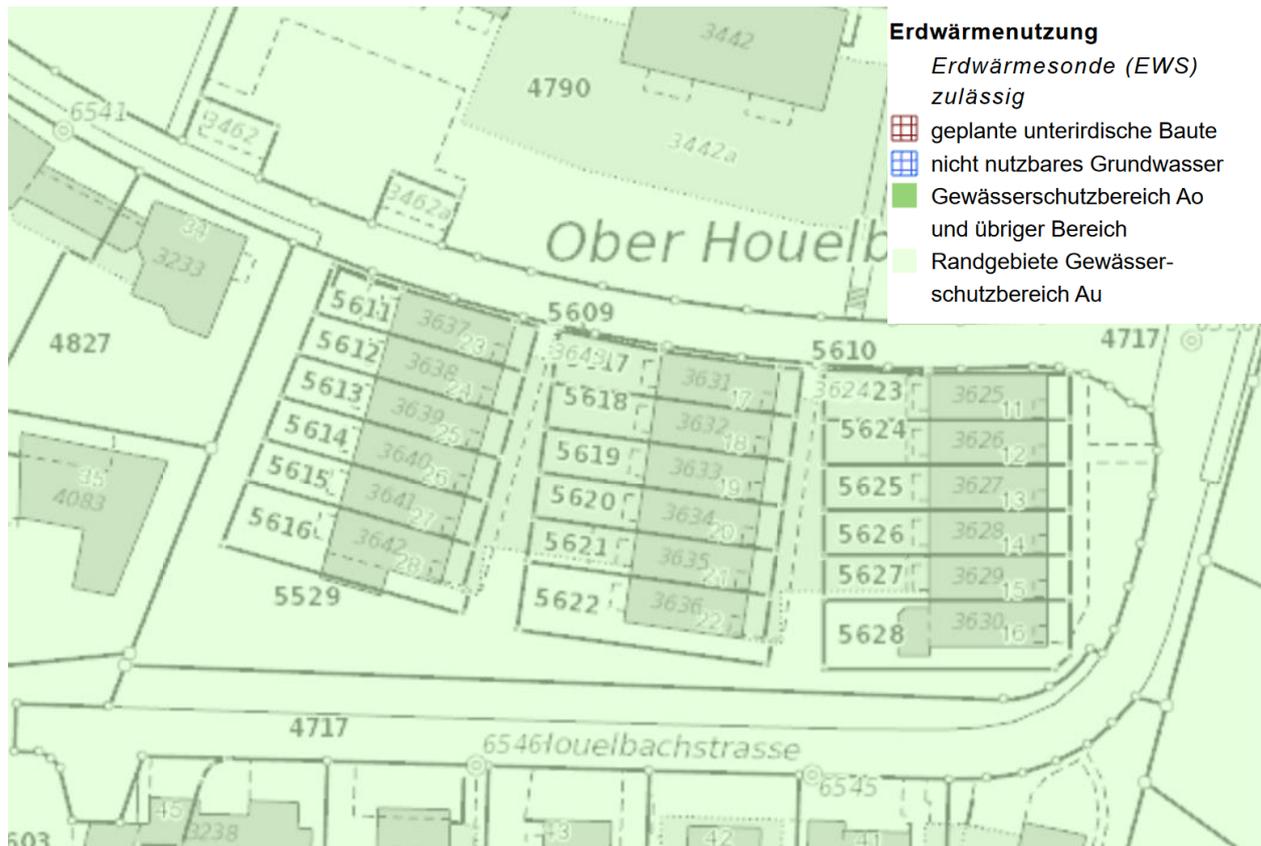


Abbildung 3: Auszug aus dem kantonalen Geoportal zur Erdwärmenutzung (Geoportal Kanton Luzern, 2022)

Das Gebiet an der Houelbachstrasse befindet sich im Randbereich des Gewässerschutzgebiets Au. Die Nutzung der Erdwärme ist somit erlaubt und eine Lösung mittels Erdsonden-Wärmepumpen kann in Betracht gezogen werden (Geoportal Kanton Luzern, 2022).

Dazu muss basierend auf der Norm-Heizlast sowie den vorherrschenden geologischen Bedingungen die Sondenlänge der benötigten Erdwärmesonden berechnet werden.

Die Länge der Sonden Meter ist abhängig von der zu erwartenden Jahresarbeitszahl kurz JAZ je höher die JAZ, desto grösser wird der Anteil der Umweltwärme. Somit muss auch eine grössere Kälteleistung erbracht werden. Die Kälteleistung entspricht hier der Umweltwärme, welche die Wärmepumpe in Heizwärme umwandeln kann.

Gemäss der SIA 384/6 (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2021), lässt sich in diesem Fall kein vereinfachtes Berechnungsverfahren für die Sonden anwenden. Die effektive Sondenlänge muss mithilfe von Simulationen berechnet werden. Dabei wird die gegenseitige Beeinträchtigung der Sonden miteinbezogen. Aber auch Effizienz Steigerungen von zukünftigen Wärmepumpen. Während der Lebensdauer von EWS wird die Wärmepumpe mindestens einmal ersetzt. Aus diesem Grund muss dafür gesorgt werden, dass die EWS auch bei einer höheren JAZ noch genügend Kälteleistung liefern können.

Da im Rahmen dieser Arbeit also keine genaue Berechnung der Sondenlänge stattfinden kann, soll nachfolgend die Anzahl Sonden und die Sondenlänge überschlagsmässig abgeschätzt werden.

Geschätzt wurde die Sondenlänge mittels der Norm-Heizlast von 75 kW, einer angenommenen Jahresarbeitszahl von 5 (Standard rund 4.5) sowie einer Entzugsleistung von $35 \frac{W}{m}$. Es wurde absichtlich eine etwas höhere Jahresarbeitszahl gewählt, um eine Effizienzsteigerung der Wärmepumpen zu berücksichtigen. So kann auch bei einem Wärmeerzeugersersatz in rund 20 Jahren noch genügend Kälteleistung von den Sonden erbracht werden. Es ergibt sich eine benötigte Kälteleistung von 60 kW. So ergibt sich eine Sonden Länge von 1'715 Metern. Bei einer Tiefe einer einzelnen EWS von 250 Metern wären 7 Sonden notwendig. Für die Arbeit soll mit diesen 7 Sonden weitergerechnet werden. Bei der Umsetzung des Heizungersatzes muss die Dimensionierung der Sonden aber mittels Simulationen durchgeführt werden.

Der Platz für die sieben Sonden ist begrenzt. Es muss abgeklärt werden, ob die Sonden so positioniert werden können, sodass sie sich gegenseitig möglichst wenig beeinträchtigen. Abbildung 4 zeigt wie und wo die Erdwärmesonden auf dem Grundstück verortet werden könnten. Dabei wurden Abstände von 10 m gewählt, um sicherzustellen, dass sich die EWS möglichst wenig gegenseitig beeinflussen.



Abbildung 4: Lokalisierung der Erdwärmesonden (rot) auf dem Siedlungsgrundstück (Geoportal Kanton Luzern, 2022)

Es ist schwierig die 7 EWS auf dem Grundstück zu positionieren ohne Gefahr zu laufen, dass sich die Sonden zu stark gegenseitig beeinflussen und so Wärmeenergie eingebüsst wird. Ausserdem gibt es in der Nachbarschaft bereits weitere EWS, welche ebenfalls dem Boden Energie entziehen. Um zu verhindern das sich das so entstehenden Erdsondenfeld innerhalb von

50 Jahren zu stark auskühlt, müssen Massnahmen getroffen werden, den Boden aktiv zu regenerieren. Dazu können auf den Dächern der Gebäude Solarthermie oder Hybrid-Kollektoren installiert werden, welche in den Sommermonaten Wärme in den Boden führen und ihn so regenerieren. Das Erdreich würde in diesem Fall auch als Energiespeicher dienen in welcher Wärme aus dem Sommer und der Übergangszeit in den Winter übertragen werden könnte. Dies kann aber nicht willkürlich geschehen. Der Boden darf nicht zu sehr erwärmt werden. Somit kann hier nur bedingt von einem Energiespeicher gesprochen werden.

3.1.3 Luft-Wasser Wärmepumpe

Als Alternative zur Erdwärmenutzung kann auch die Umgebungswärme der Aussenluft mittels einer Luft-Wasser-Wärmepumpe verfügbar gemacht werden. Aufgrund der tieferen Quelltemperatur, insbesondere während der Heizsaison, erzielen solche Wärmepumpen aber tiefere Leistungszahlen (COP) als Erdwärme- oder Grundwassersysteme. Dadurch erhöhen sich die Betriebskosten. Zukünftig könnten aufgrund der Winterstrom-Problematik höhere Stromtarife an Tagen mit tiefen Aussentemperaturen eingeführt werden. Da die Luft-Wasser-Wärmepumpen im Winter besonders tiefe Leistungszahlen erreicht, könnte sie sich in Zukunft als Kostenfalle herausstellen, insbesondere bei schlecht gedämmten Bauten und hohen Vorlauftemperaturen. Im Falle der Überbauung an der Houelbachstrasse, mit dem guten Baustandard und der Fussbodenheizung welche sehr niedrige Vorlauftemperaturen benötigt ist dies weniger ein Problem. Dennoch wird eine Luft-Wärmepumpe höhere Betriebskosten aufweisen als eine Erdsonden-Wärmepumpe. Dies liegt an der geringeren Jahresarbeitszahl. Die Jahresarbeitszahl ist von der Differenz der Quelltemperatur und der Vorlauftemperatur abhängig. Je grösser diese Temperaturdifferenz ist, desto geringer die Jahresarbeitszahl. Wird Luft als Wärmequelle verwendet so ist gerade in der Heizperiode die Quelltemperatur besonders tief. Dies führt zu einer höheren Temperaturdifferenz. Es heisst nicht, dass die Wärmepumpe in diesem Fall weniger Wärme liefert. Es wird allerdings mehr Strom benötigt, um dieselbe Menge an Wärme bereitzustellen. Daraus ergeben sich die höheren Betriebskosten.

Trotzdem sind Luft-Wärmepumpen finanziell oftmals sehr attraktiv. Sie überzeugen durch bedeutend geringere Investitionskosten als eine Erdsonden-Wärmepumpe. Auch die etwas höheren Betriebskosten sind aufgrund der hohen Effizienz der Anlage noch immer bedeutend geringer als bei einem fossilen Heizsystem. Bei der Umsetzung solcher Heizungen gilt es allerdings ein Paar Punkte zu beachten. Es gibt die Möglichkeit Luft-Wärmepumpen innen- oder aussenaufgestellt zu realisieren. In beiden Fällen muss dafür gesorgt werden, dass die Lärmbelastung im Betrieb auf ein Minimum beschränkt wird. Die Lärmemissionen stammen dabei von den benötigten Ventilatoren, den umgewälzten Luftvolumen sowie der Arbeit des Kompressors.

Für aussenaufgestellt Wärmepumpen ist besonders deren Platzierung sowie die benötigte Leistung entscheidend für die Lärmemissionen. Die Wärmepumpe sollte nicht direkt unter Schlafzimmer Fenstern oder ähnlichem platziert werden. Ausserdem sollte die Wärmepumpe so platziert werden, dass sich der Schall nicht negativ auf die Nachbarn auswirken kann. Das heisst möglichst weit vom benachbarten Grundstück entfernt.

Die Lärmemissionen nehmen mit zunehmender Anlagenleistung ebenfalls zu. Die Leistung ist ein weiterer Punkt, welcher eine Lösung mittels Luft-Wärmepumpe erschwert. Es gibt kaum Standard Luft-Wasser Wärmepumpen, welche die geforderte Leistung von den rund 75 kW erbringen können. Höchstens sehr grosse Industrieeräte, aber diese sind kaum für den Einsatz im

bewohnten Gebiet gedacht. Es müssen beispielsweise mehrere kleineren Anlagen in Kaskade geschaltet verwendet werden. Diese müssen meistens aussenaufgestellt realisiert werden. Aus diesem Grund verstärkt sich die Problematik der Lärmbelastung noch mehr. Es müssen mehr Anlagen ordnungsgemäss platziert werden und die Schallwellen der beiden Anlagen könnten überlagern und verstärken. Neben den Kaskadenanlagen gibt es noch weitere Möglichkeiten, um Luft-Wärmepumpen in der geforderten Leistung zu realisieren. Es ist möglich Spezialanlagen anfertigen zu lassen, welche innerhalb des Gebäudes erstellt werden können.

Wird eine Luft-Wärmepumpe innerhalb eines Gebäudes installiert, so muss sichergestellt werden, dass das Gebäude ausreichend gegen Schwingungen und Schall geschützt wird. Die Wärmepumpe und der Wärmetauscher müssen auf stabilem Grund und vorzugsweise auf Schwingungsdämpfern installiert werden. Nur so kann verhindert werden, dass innerhalb des Gebäudes keine Geräusche und Vibrationen übertragen werden. Dies gilt grundsätzlich für alle Wärmepumpen. Bei Luft-Wärmepumpen aber doppelt da auch die Schwingung des Ventilators gedämmt werden muss.

3.1.4 Hybrid-Kollektoren als Wärmequellen für Wärmepumpen

Mittels PVT-Hybridkollektoren kann gleichzeitig Strom und Wärme produziert werden, woraus hohe Gesamtwirkungsgrade resultieren. Dadurch lässt sich eine insgesamt bessere energetische Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Dachfläche erreichen. Die so gewonnene, thermische Energie kann in einem Wasserspeicher gespeichert werden, welcher einer Sole-Wasser-Wärmepumpe als Wärmequelle dient. Dieses System wurde von der ZHAW entwickelt und nennt sich L-Sol. Alternativ kann die Wärmepumpe auch direkt hydraulisch mit den Kollektoren verbunden werden, wie es beispielsweise das «SOLINK»-System des Herstellers «Consolar» vorsieht. Abbildung 5 zeigt das Schema der Firma CONSOLAR. Die Wärme wird dann, nachdem sie von der Wärmepumpe auf ein höheres Temperaturniveau befördert wurde, in Form von Nutzwärme in einem Pufferspeicher gespeichert.

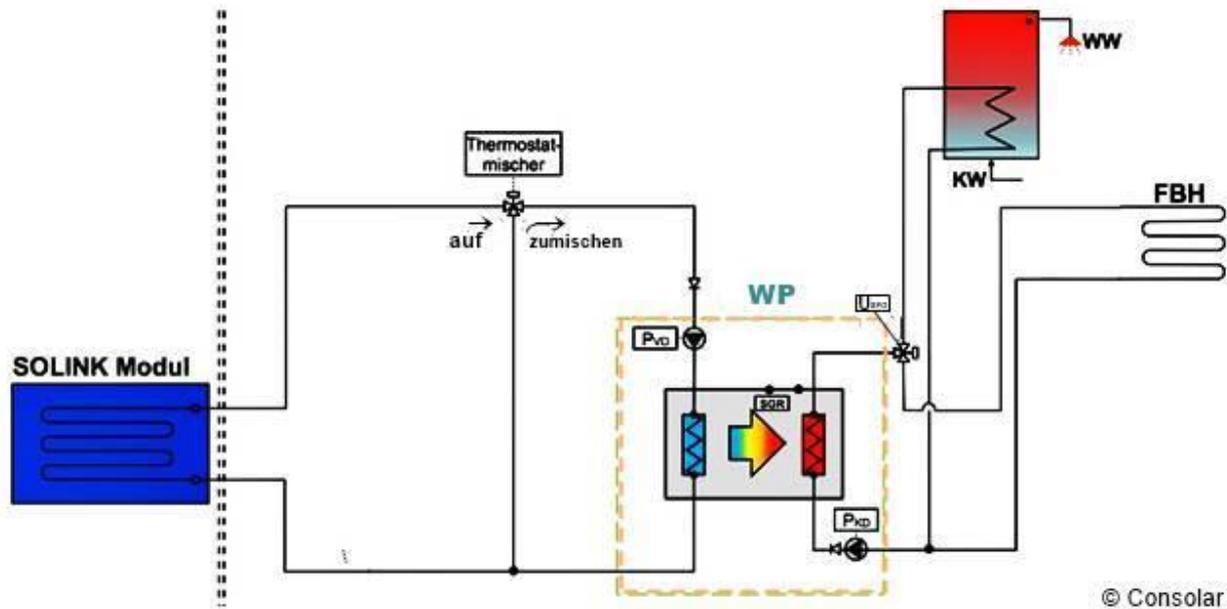


Abbildung 5: Hydraulisches Schema des «SOLINK»-Systems des Herstellers «Consolar» (Müller et al., 2022).

Mit PVT-Kollektoren lassen sich im Vergleich zur Aussenluft als Wärmequelle bessere Jahresarbeitszahlen (JAZ) erzielen (Consolar, 2022). Ausserdem können die PV-Zellen im Sommer aktiv gekühlt werden, was zu einer höheren Effizienz und Lebensdauer führt. Gemäss (Consolar, 2022) sind 6-10% höhere Stromerträge möglich.

Allerdings fällt der Hauptteil der thermischen Energie aufgrund des höheren Strahlungsangebotes der Sonne im Sommerhalbjahr an, wo bekanntlich nur ein geringer Wärmebedarf in einem MFH besteht. Ohne Saisonale Wärmespeicherung bleibt demnach viel Energie ungenutzt. Auch die Resultate der ZHAW bestätigen, dass die Mehrerträge des L-SOL Systems die höheren Investitionen nicht kompensieren können (Rohrer, 2022).

Der Hersteller «Consolar» gibt an, dass ihr System mit den «SOLINK»-PVT-Kollektoren, welche speziell für die Wärmepumpen-Nutzung entwickelt wurden, ähnliche Jahresarbeitszahlen wie Erdwärmesonden-Systeme ermöglichen. Auch die Investitionskosten sollen mit einer Sole/Wasser-Wärmepumpe inklusiv Erdwärmesonde und PV-Anlage vergleichbar sein (Consolar, 2022). Angenommen diese Aussage stimmt, so könnten die Lebenszykluskosten des Systems geringer sein als bei einer Luft-Wärmepumpe inklusiv PV-Anlage. Aus diesen Gründen wird die Variante nachfolgend ausführlich geprüft.

Im Gegensatz zu einer herkömmlichen PV-Anlage ist ein Ost/West-Aufständigung beim «Consolar»-System ungeeignet. Ost/West-Anlagen produzieren im Winter aufgrund des tiefen Sonnenstandes deutlich weniger Elektrizität und thermische Energie als nach Süden ausgerichtete Referenzanlagen. Genau in diesem Zeitraum sollte die Wärmepumpe jedoch mit möglichst viel Wärme und PV-Strom versorgt werden.

Die Dächer an der Houelbachstrasse eisen einen Neigungswinkel von rund 33 ° auf und sind gegen Osten und Westen ausgerichtet. Wobei die westliche Seite des Gebäudes noch

Dachfenster und andere Hindernisse aufweist. Somit sollte lediglich die Ostseite der Gebäude für eine PV-Anlage oder Hybridkollektoren in Betracht gezogen werden. In Abbildung 6 lässt sich der Dachaufbau, welcher bei den drei Gebäuden praktisch identisch ist, erkennen. Die Ostseite weist einige Fenster auf, welche bei der Modulfeldplanung einbezogen werden müssen. Dies sollte allerdings kein Problem sein wie die bereits vorhandene PV-Anlage beweist.



Abbildung 6: Ansicht auf die Ostseite eines Daches an der Houelbachstrasse

Die neusten Hybridmodule von der Firma CONSOLAR mit einer Fläche von 2.4 m^2 sind grösser als Standard Photovoltaikmodule. Dank ihrer Grösse erzielen sie auch eine entsprechend grosse elektrische Leistung von 485 Wp .

Somit kann das Modullayout nicht einfach übernommen werden. Erste Abschätzungen zeigen, dass auf dem Dach lediglich der Abschnitt unterhalb der Dachfenster genutzt werden kann. So lassen sich auf dem Dach rund 28 Module installieren. Wird allerdings von einer maximalen Belegung des Daches ausgegangen, in der Flächen, auf denen kein Modul Platz hat mit blind Modulen belegt werden, können 33 Module installiert werden. Wird dies auf allen drei Dachflächen umgesetzt, so ergibt sich eine Anlage mit 99 Modulen. Dies entspricht einer elektrischen Leistung von maximal 48 kWp . Es muss allerdings abgeklärt werden, ob die so erzielte Wärmetauscher Leistung ausreichend ist, um die Gebäude über den Winter mit Wärme zu versorgen. Gemäss der technische Dokumentation der «Solink» Module fällt die benötigte Kollektorfläche auf geneigten Dächern grösser aus (CONSOLAR, 2022). Die Technische Dokumentation bietet eine Faustregel zur Berechnung der benötigten Kollektorfläche. So wird bei einer modulierenden Wärmepumpe eine Fläche von 3.6 m^2 pro kW benötigt. Bei einem Heizleistungsbedarf von 75 kW wird also eine Fläche von 270 m^2 benötigt.

Es sind 3 Dachflächen verfügbar, auf jeder lassen sich maximal 33 Module installieren. Bei einer Fläche von 2.4 m² ergibt sich somit eine Kollektorfläche von maximal 237.6 m². Somit kann auch bei einer maximalen Belegung aller drei Dachflächen nicht genügend Wärmetauscher Leistung installiert werden, um die Gebäude nur mit «Solink» Modulen zu heizen. Es gilt zudem abzuklären, ob ein solches System am Standort umsetzbar wäre. Schliesslich erfüllen die installierten Module nicht die Anforderungen der südlichen Ausrichtung. Ausserdem ist die hydraulische Einbindung der Module auf dem Gebäude, welches am weitesten vom Heizungskeller und somit auch der Wärmepumpe nur schwer realisierbar. Somit lassen sich maximal nur 66 Module installieren was einer Fläche von 158 m² entspricht. Somit muss eine Heizung basierend auf reinen Solink Modulen verworfen werden. In der technischen Dokumentation der Module wird allerdings noch eine weitere Methode zu Verwendung der Hybridmodule beschreiben. Diese soll in den folgenden Kapiteln genauer betrachtet werden.

3.1.5 Bivalentes System EWS und «Solink» Module

Gemäss der Firma «Consolar lassen sich die Module auch optimal mit Erdwärmesonden kombinieren (CONSOLAR, 2022). So lässt sich der Wärmeentzug aus der EWS reduzieren und im Sommer lässt sich die EWS schneller regenerieren. Dies ist besonders nützlich, wenn die Erdwärmesonden sich nicht optimal auf das System angepasst dimensionieren lassen oder mit Beeinträchtigungen von benachbarten Sonden gerechnet werden muss. Da eine Heizung basierend auf Erdwärmesonden aufgrund der geringen Sondenabständen nicht sinnvoll scheint und auch eine Heizung basierend auf den Hybridkollektoren verworfen werden musste, soll die Kombination der beiden Varianten geprüft werden.

3.2 Lösungsvarianten elektrische Energieerzeugung

Zur elektrischen Energieerzeugung wurde im vorangehenden Kapitel 3.1.4 bereits die Möglichkeit der Nutzung von Hybridkollektoren beschrieben. Diese dienen nicht nur als Wärmequelle für die verbundene Wärmepumpe, sondern auch als Erzeuger von elektrischer Energie. Das elektrische Potenzial dieser Anlage soll mit einer reinen PV-Anlage verglichen werden.

3.2.1 Reine Photovoltaikanlage

Eine reine Photovoltaikanlage ist auf den Dächern der Siedlung sicherlich denkbar. Schliesslich wurde das Dach einer der Parteien bereits mit Photovoltaikmodulen bestückt. Aufgrund der Ästhetik, sofern man auf den Einsatz von Blindmodulen und Füllblechen verzichten will, wird es nicht möglich sein die verfügbare Fläche derart effizient auszunutzen, wie es in der folgenden Abbildung 7 ersichtlich ist. Auf dem Dach bestehen zu viele Hindernisse wie Kamine, oder Dachfenster. So lassen sich stellenweise keine Module platzieren. Es käme zu einer sehr verzerrten Anlage, welche von keinem Solarplaner umgesetzt werden würde. Es gäbe die

Möglichkeit nur einen Teil des Daches zu belegen. Bei dieser minimalistischen Planung würde lediglich ein Streifen an der unteren Kante des Daches belegt.



Abbildung 7: Bereits bestehende PV-Anlage (Müller, 2022)

Auf diesem Streifen lassen sich 37 Module des Typs JAM60S20-385, mit einer Leistung von 385 Wp lassen installieren. Dies ergibt eine elektrische Nennleistung von 14.2 kWp pro Dach. Für die gesamte Anlage wäre dies dann eine Leistung von 42.6 kWp. Gemäss einer groben Abschätzung lassen sich mit dieser Anlage rund 40'340 kWh elektrischen Strom produzieren. Die in diesem Kapitel genannten Ertragszahlen sind Durchschnittswerte und basieren auf einer Simulation mit der Software Polysun und den zu den Modulen gehörenden Degradationswerten (JaSolar, 2022). Die Ertragsannahmen beziehen sich auf die Dauer von 25 Jahren. Solarmodule degradieren mit der Zeit und liefern bereits nach den ersten Jahren weniger Strom als noch zuvor. Um ein für die folgenden Berechnungen sinnvollerer Bild zu zeichnen, wird also mit dem durchschnittlichen jährlichen Ertrag über die gesamte Lebensdauer der Anlage gerechnet.

Wird wie in der Abbildung 7 das Dach vollständig mit PV-Modulen belegt und Flächen, auf denen kein Modul Platz hat mit Blindmodulen oder Blechen verdeckt so lassen sich 65 Module mit einer Nennleistung pro Dach von 25 kWp installieren. Dies ergibt ein Gesamtleistung von 75 kWp und ein Ertrag von ungefähr 65'990 kWh pro Jahr.

3.2.2 Hybrid-Kollektoren

Wie bereits im Kapitel 3.1.4 beschrieben, macht die Installation der Hybridkollektoren nur auf zwei der drei Dächer Sinn. Da die hydraulische Einbindung der Kollektoren ab dieser Distanz schwierig ist, auch im Fall eines bivalenten Heizungssystems. Aus diesem Grund wird die dritte Dachfläche in diesem Szenario nicht berücksichtigt. So nimmt die Anlagen Leistung deutlich ab. In einem konkreten Energiekonzept basierend auf Hybridkollektoren könnte die verbleibende Dachfläche mit gewöhnlichen PV-Modulen bestückt werden.

Die Hybridkollektoren der Firma CONSOLAR haben eine elektrische Leistung von 485 kWp. Bei 33 Modulen ergibt sich so eine elektrische Nennleistung von 16 kWp. Der PV-Ertrag sollte höher ausfallen als üblich. Schliesslich kühlt die gleichzeitige thermische Nutzung der Module die Module ab und steigert somit den Ertrag. Gemäss der Firma CONSOLAR führt dies zu Ertragssteigerungen zwischen 6 % und 10 % (Consolar, 2022). Der zu erwartende PV-Ertrag beläuft sich somit auf maximal 22'832 kWh. Wie zu erwarten war, ist der PV-Ertrag bedeutend geringer als bei der reinen PV-Anlage. Doch die doppelte Nutzung der Dachfläche sollte diesen Umstand kompensieren. Somit lassen sich die beiden Varianten nicht 1:1 vergleichen, da der Nutzen der thermischen Solarerträge schwer zu quantifizieren ist. Ein Einsatz der Hybridkollektoren lohnt sich also nur, wenn die erzeugte Wärmeenergie auch sinnvoll eingesetzt und genutzt werden kann.

3.3 Lösungsvarianten Energiespeicher

Um die Energie, sei dies elektrische Energie oder Wärmeenergie zu speichern gibt es verschiedene Möglichkeiten. Diese sollen in den folgenden Kapiteln beschrieben werden.

3.3.1 Stromspeicher

Die Systemkosten von Batteriespeichern sind aktuell noch zu hoch, um einen rentablen Betrieb zu ermöglichen. Ausserdem entstehen schwerwiegende ökologische Schäden bei der Batterieherstellung (Zogg et al., 2021). Sind aber Elektroautos vorhanden, könnten die Akkumulatoren dieser Fahrzeuge auch genutzt werden, um Stromüberschüsse aufzufangen und bei Bedarf wieder für das Gebäude zur Verfügung zu stellen.

3.3.2 Sensible Wärmespeicher

Thermische Energie lässt sich im Vergleich zu Elektrizität deutlich preiswerter und umweltfreundlicher speichern. Mittels einer Wärmepumpe kann eigens produzierter Strom effizient in Nutzwärme umgewandelt werden, welche dann in einem Wärmespeicher zwischengelagert werden kann. Von da aus kann sie genutzt werden, wenn nicht ausreichend Solarstrom für die Wärmepumpe zur Verfügung steht.

Sensible Wärmespeicher sind heute für dezentrale Einsätze in Wohnbauten die einzig markterprobte und wirtschaftliche Lösung. Sie speichern Energie «fühlbar», indem die Temperatur des Speichermediums erhöht wird. Meist wird als Medium Wasser verwendet.

3.3.3 Eisspeicher

Der Eisspeicher kann als Wärmequelle für eine Wärmepumpe aber auch als Wärmespeicher dienen. Beim Eisspeicher handelt es sich um eine im Boden vergrabene Zisterne, meist aus Beton. Dieser Speicher wird bis kurz unter den Rand mit Regen- oder Leitungswasser gefüllt. Der Speicher ist mit Wendelwärmetauschern versehen, welche zu einer Sole-Wasser Wärmepumpe führen. Diese entzieht dem gespeicherten Wasser Energie bis dieses anfängt zu gefrieren. Der Eisspeicher nutzt, anders als andere Energiespeicher, nicht die Wärmekapazität des Wassers, sondern die Schmelzwärme. Beim Gefrieren des Wassers wird Energie frei, welche zur Wärmeerzeugung genutzt werden kann. Durch das gezielte Wechselspiel von Wärmeentzug und Wärmeeintrag kann der Gefrierprozess mehrmals wiederholt werden. So kann die Schmelzwärme wiederholt genutzt werden. Für den Wärmeeintrag werden Solarthermie-Kollektoren oder Hybrid-Kollektoren genutzt (Minder et al., 2014). Verglichen mit einer Wärmepumpe und einer Erdwärmesonde werden weniger intensive Grabarbeiten benötigt. Ausserdem werden anstelle von mehreren Erdwärmesonden nur eine einzelne Beton Zisterne verbaut. So entstehen bei einem erdverlegten Eisspeicher rund 5 %-Punkte geringere Umweltbelastungen als bei einer Erdwärmesonde. Allerdings wirkt sich das komplexere System auch auf die Wärmegestehungskosten aus. Diese nehmen bei einem Eisspeicher um 20 % zu (Minder et al., 2016).

Der Einsatz des Eisspeichers weist genau wie der sensible Energiespeicher grosses Potenzial auf. Um seinen vollen Nutzen zu entfalten, muss der Speicher entsprechend dimensioniert werden. Besonders bei hohen Heizlasten wird ein grosses Speichervolumen benötigt. Wie gross der Speicher an der Houelbachstrasse ausfallen muss und ob dieser am Standort untergebracht werden kann, konnte allerdings nicht abschliessend bestimmt werden. Die einzelnen Hersteller solcher Systeme konnten keine Dimensionierungsanleitungen bereitstellen. Auch eine Internet-Recherche führte zu keinen weiteren Erkenntnissen wie Faustregeln zur Dimensionierung, Kosten oder ähnlichem. Referenzsysteme welche von den verschiedenen Anbietern publiziert wurde handelten meist von Industrie- und Gewerbegebäuden, welche alle ganz andere Bedürfnisse hatten wie die Siedlung Houelbachstrasse. Um eine solche Lösung zu prüfen und umzusetzen müsste also ein eigenes Projekt bei den Herstellern angestossen werden.

3.4 Lösungsvorschläge Energieeffizienz

Neben der erneuerbaren Erzeugung von Wärmeenergie und elektrischer Energie besteht auch die Möglichkeit den Endenergiebedarf zu senken. Dies kann durch den Einsatz moderner Komponenten wie Umwälzpumpen erreicht werden. Aus diesem Grund soll ein Austausch dieser Pumpen diskutiert werden. Ausserdem können Energiemanagement-Systeme dabei helfen den eigens produzierten Strom effektiv einzusetzen. Auch diese Möglichkeit soll in diesem Kapitel besprochen werden.

In der Ist-Situationsanalyse wurde ersichtlich, dass es eine sehr grosse Spannweite zwischen den Wärmebedarfen der einzelnen Wohnungen gibt. Die grossen Unterschiede stammen auch von den verschiedenen Wohnungssituationen. Eckhäuser weisen eine grössere Fläche auf an denen Wärme verloren gehen kann. Daher stammt auch ein grösserer Heizwärmebedarf. Oftmals stammen solche Unterschiede auch aus dem weniger rücksichtsvollen Umgang mit der Energie. In diesem Kapitel sollen deshalb Massnahmen beschrieben werden, um die Bewohner für die Thematik zu sensibilisieren.

3.4.1 Ersatz von Umwälzpumpen

In der Siedlung an der Houelbachstrasse bestehen einige Umwälzpumpen, welche durch moderne und hocheffiziente Pumpen ersetzt werden können. Dies ist einfach umsetzbar so bald an den Heizungsinstallationen im Keller Änderungen vorgenommen werden. Im Zentrum steht dabei die Pumpe, welche das Heizwarmwasser in die restlichen Gebäude verteilt. Die Pumpe, welche dafür zuständig ist, ist vom Typ UPE 32-80. GRUNDFOS bietet ein Tool auf ihrer Homepage an mit welchem schnell und einfach ein Ersatzprodukt für die bestehende Pumpe gefunden werden kann. So schlägt GRUNDFOS den Ersatz der bestehenden Pumpe durch das Model «MAGNA1 32-100» vor. Neben der Hauptpumpe befindet sich auch in jeder Wohnung eine Umwälzpumpe, welche das Heizwarmwasser innerhalb der Wohnung verteilt. Innerhalb der Wohnung sind Umwälzpumpen der Firma GRUNDFOS, vom Typ UPS 25 -30 verbaut. Gemäss Grundfos kann die Pumpe durch eine neue Pumpe des Typs «ALPHA2 25-40 180» ersetzt werden (GRUNDFOS, 2017). Dabei handelt es sich um eine modulierende Pumpe, welche die Leistung nach dem Anlagenbedarf regulieren kann. Mit neuen Umwälzpumpen kann derselbe Komfort aufrechterhalten werden aber mit einem geringeren Energieaufwand. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Stromverbrauch der Umwälzpumpen um rund 40 % reduziert werden kann. Dies entsprechen jährlich rund 200 kWh oder 42 CHF weniger Stromkosten. Genauere Informationen dazu finden sich im beigelegten Energiesparblatt.

3.4.2 Energiemanagement Systeme

In dem vorangegangenen Kapitel wurden Systeme zur Produktion von erneuerbarem Strom und Wärme beschrieben. Diese Systeme allein erfüllen ohne weiteres ihren Zweck, doch nur wenn sie aufeinander abgestimmt sind, lassen sich die vorhandenen Ressourcen effizient und effektiv einsetzen. Um die Systeme intelligent miteinander zu verbinden kann ein Energiemanagementsystem eingesetzt werden. Eine Studie von Energie Zukunft Schweiz und des Bundesamts für Energie BFE hat die folgende Definition für ein Energiemanagementsystem EMS festgelegt.

«Das EMS ermöglicht neben der systematischen Erfassung und Kommunikation der Energieströme (Verbrauch und Produktion) auch die automatische Steuerung von Einrichtungen und Apparaten (z.B. Wärmepumpen, Ladestationen, etc.)» (Meier et al., 2020, S.3).

Gemäss der Studie hat sich der Markt für EMS stark entwickelt und vergrössert. Eine Marktübersicht zeigt, wie unübersichtlich und komplex die Angebote sind (Meier et al., 2020). So fällt die Wahl eines passenden EMS nicht einfach. In der Studie wurden 38 EMS vorgestellt und deren Firmen portraitiert. 17 dieser Firmen aus der Schweiz und 21 aus den umliegenden Ländern wie Deutschland, Österreich und Lichtenstein. Viele dieser Firmen zielen mit ihren Produkten und Dienstleistungen allerdings nicht auf Hausbesitzer und Vermieter ab, sondern auf grosse Immobilienverwaltungen, Industriebetriebe und Energieversorgungsunternehmen. Doch auch für Private Kunden gibt es entsprechende EMS Lösungen. So zum Beispiel das Produkt «PROPILOT» von der Firma Meo-Energy (meo ENERGY, 2022b). Das Produkt der österreichischen Firma umfasst einen Controller, der alle Energieströme innerhalb des Gebäudes erfasst und in einer Cloud-Applikation visualisiert. Ausserdem ermöglicht der Controller die Steuerung der integrierten Komponenten sowie die Auswertung der aktuellen Betriebszustände in Echtzeit. So lässt sich der Eigenverbrauch und der Autarkiegrad der Anlage erhöhen. Durch die zusätzliche Integration des meo «ActiveHeat® MANAGER» lässt sich ausserdem eine Wärmepumpe effizient betreiben (meo ENERGY, 2022a). Die Software ermöglicht den Betrieb der Wärmepumpe basierend auf Wettervorhersagen. Ausserdem lassen sich Trinkwasser und Pufferspeicher vorrangig mit dem eigens erzeugten PV-Strom heizen. Daneben versucht die Software das Gebäude als Wärmespeicher zu nutzen. Mit diesen Massnahmen wird der Energiebedarf der Wärmepumpe aufgrund von vorteilhaften Betriebsbedingungen gesenkt und der zur Verfügung stehende PV-Strom wird effektiv verwertet und gespeichert.

3.4.3 Ersatz von Elektroboilern durch Wärmepumpenboiler

Die Bereitstellung von Warmwasser obliegt jedem Eigentümer selbst. Ein Paar wenige Bewohner der Siedlung haben Ihre Warmwasseraufbereitung bereits erneuert und haben dazu einen Wärmepumpenboiler installiert. Dabei handelt es sich um einen Warmwasserspeicher mit einer integrierten Luft-Wasser Wärmepumpe. Diese stellt Brauchwarmwasser um einiges effizienter bereit als ein Elektroboiler.

Genau wie bei der Umwälzpumpe lassen sich mit einem Wärmepumpenboiler die Stromkosten signifikant senken. Genauere Informationen werden wiederum auf dem beigelegten Energiesparblatt erläutert.

Mit der Umsetzung des Heizungsersatzes und des erweiterten Energiekonzeptes könnten auch im grossen Stil die Elektroboiler ersetzt werden. So lässt sich eventuell von Mengenrabatten oder anderen Kosteneinsparungen profitieren.

3.5 Fazit

Abschliessend sollen die Systeme welche als potenzielle Lösung für die Wärmeerzeugung oder Stromerzeugung betrachtet wurden nochmals zusammengefasst werden. Ausserdem sollen die ausgewählten Systeme zu Varianten zusammengefasst werden, welche in den kommenden Kapiteln weiter ausgearbeitet werden.

3.5.1 Wärmeerzeugung

Für die Wärmeerzeugung zeigen besonders die Systeme, welche auf Wärmepumpen basieren das grösste Potenzial. Die PVT-Hybridkollektoren mussten verworfen werden. Um die Gebäude vollständig mit ihnen zu heizen, besteht zu wenig Platz auf den Dächern. Es kann nicht genügend Wärmetauscher Leistung installiert werden. Auch die Holzpellet-Heizung musste verworfen werden, da die ökologischen Auswirkungen der Holzverbrennung den daraus gewonnen Nutzen nicht kompensieren können. Eine Holzfeuerung bringt auch andere negative Effekte für die Eigentümerschaft mit sich. Es müssten neu, Aufwände für die Brennstoffbeschaffung betrieben werden. Ausserdem muss grosser Aufwand für den Unterhalt und den Betrieb der Anlage in Kauf genommen werden. Abgesehen davon entstehen durch die Verbrennung von Holz Schäden an Mensch und Umwelt. Die durch die Holzverbrennung entstehenden Feinstaubemissionen können zu Atemwegserkrankungen führen. Im städtischen Gebiet, wo die Feinstaubbelastung bereits besonders hoch ist, sollte also auf zusätzliche Feinstaubquellen verzichtet werden. Aber auch die CO₂-Emissionen dürfen nicht vernachlässigt werden. Allein für den Transport entstehen jährlich rund 310 kg CO₂. Aus diesen Gründen konnte für die weitere Variantenauswahl keine Holzfeuerung berücksichtigt werden.

Aus diesem Grund sollen in den folgenden Kapiteln zur Wärmeerzeugung eine Luft-Wasser Wärmepumpe sowie eine Sole-Wasser Wärmepumpe untersucht werden.

3.5.2 Stromerzeugung

Für die Stromerzeugung stehen zwei Varianten zur Verfügung. Die erste Variante, die reine Stromerzeugungsanlage erzeugt deutlich mehr elektrische Energie als die Anlage mit den PVT-Hybridkollektoren. Die Hybridkollektoren sind interessant da sie eine Doppelnutzung der Dachfläche ermöglichen. Dies ist allerdings nur interessant, wenn die vom Dach gewonnenen Wärme auch wirklich genutzt werden kann. Somit muss die Wahl zwischen beiden Anlagen abhängig vom Wärmeerzeugungssystem getroffen werden. Bei einer Erdsonden-Wärmepumpe können die thermischen Solarerträge zur Regeneration der Erdwärmesonden dienen. Aus diesem Grund sollen bei diesen Konzepten Hybridkollektoren eingesetzt werden.

3.5.3 Energiespeicher

Sofern sinnvoll sollen auch sensible Energiespeicher, also Warmwasserspeicher betrachtet werden. Die Speicher sollen helfen, Wärme bei einem hohen COP bereitzustellen und Überschüsse zu speichern. Es soll in Betracht gezogen werden, die Speicher zu überhitzen und so noch mehr Wärme zu speichern.

Batterien sollen nicht zum Einsatz kommen in den Energiekonzepten. Sie sind zu teuer und die daraus entstehenden Umweltbelastungen zu gross. Zukünftig sollen allfällige Solarstromüberschüsse mittels Elektroautos und bidirektionalen Ladestationen genutzt werden. Wenn ein solches Konzept eingeführt wird, entscheidet die Eigentümerschaft. Erst wenn das Bedürfnis für Ladestationen aufkommt, sollte über dieses System nachgedacht werden.

3.5.4 Energieeffizienz

Alle diskutierten Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz lassen sich einfach umsetzen. Das Energiemanagementsystem ermöglicht einen effektiven Einsatz des eigens produzierten Stroms. Ausserdem lassen sich die Wärmepumpen so steuern, dass sie Wärme während Zeiten mit guten Betriebsbedingungen bereitstellen. Dies steigert die Energieeffizienz der Anlage. Die Integration eines solchen EMS lässt sich leicht in den Bau der neuen Heizungsanlage integrieren und sorgt somit nicht für erhebliche zusätzliche Aufwände. Oftmals verfügen Lieferanten von Wechselrichtern oder Wärmepumpen über ähnliche Systeme. Bei der Anschaffung des neuen Heizsystems oder einer Solarstromanlage sollte auf die Verfügbarkeit eines EMS geachtet werden. So muss nicht noch ein Produkt eines dritten Anbieters gekauft werden.

Der Ersatz der Umwälzpumpen ist etwas aufwändiger. Die Pumpen befinden sich in den Kellern der einzelnen Wohnungen. Somit obliegt ein Ersatz dieser Umwälzpumpen den einzelnen Besitzern der Eigentümshäuser. Eventuell kann ein grossflächiger Ersatz aber dennoch über den Erneuerungsfonds der Siedlung finanzieren lassen. Der Ersatz hätte einen äusserst positiven Effekt und würde sich relativ schnell amortisieren lassen.

3.5.5 Variantendefinition

Basierend auf dem oben beschriebenen Fazit wurden die folgenden Varianten definiert, welche in den kommenden Kapiteln genauer betrachtet werden sollen.

- Luft-Wasser Wärmepumpe und reiner Stromerzeugungsanlage
(«LW-WP mit PV»)

Sole-Wasser Wärmepumpe mit Hybridkollektoren sowie mit und ohne Photovoltaikanlage
(«EWS + PVT mit und ohne PV) »

- Bivalentes System aus EWS und Luft-Wasser Wärmepumpe mit Solarstromanlage
(«Bivalent»)

4 Vorprojekt - Varianten Ausarbeitung

In der Vorstudie wurde die Ist-Situation beschrieben. Ausserdem wurde anhand einer Potenzialanalyse abgeklärt welche Heizwärmeerzeuger und welcher Stromerzeugung Systeme eingesetzt werden können. Die in der Vorstudie definierten Varianten wurden in Polysun simuliert. So konnten die wichtigsten Kennzahlen in Erfahrung gebracht werden. Ausserdem wurde es aufgrund der Simulationen möglich die Anforderungen an die Systeme zu konkretisieren. So soll im weiteren Verlauf der Arbeit das Energiekonzept weiter konkretisiert werden. Zum Vergleich der Resultate wurde zusätzlich ein Referenzmodell erstellt. Dieses beschrieb den aktuellen Zustand der Heizungsanlage. Zum Vergleich der verschiedenen Varianten wurden die folgenden Kennzahlen im Polysun ausgewählt:

- Nutzenergie [kWh] Quse
- Brennstoff und Stromverbrauch [kWh] Eaux
- Gesamter Stromverbrauch [kWh] Ecs
- Netzbezug [kWh] Efeg
- Eigenverbrauchsanteil [%] Rocs
- Autarkiegrad [%] Raut
- Systemjahresarbeitszahl SPF-SHP

4.1 Referenzmodell

Das Referenzmodell beschreibt den aktuellen Zustand der Heizungsanlage. Diese besteht, wie bereits in der Ist Situationsanalyse beschrieben aus einer 105 kW Gasheizung von der Firma Viessmann. In der Ist-Situationsanalyse wurde allerdings herausgefunden, dass die zurzeit installierte Heizung überdimensioniert wurde. In dieser Variante wird deshalb davon ausgegangen, dass die Heizung durch eine neue, optimal dimensionierte Gasheizung ersetzt wird. Gemäss der Berechnung der Norm-Heizlast ist eine 75 kW ausreichend.

Das Warmwasser für die Heizung wird über einen externen Wärmetauscher an das Verteilnetz abgegeben. Von da an wird das Warmwasser in die Gebäude verteilt. Es konnte leider nicht herausgefunden werden auf welchen Temperaturniveaus die Wärmeübertragen wird. Die Wärmeverteilung innerhalb der Gebäude wird über eine Fussbodenheizung erreicht. Aus diesem Grund wird angenommen, dass die Vorlauftemperaturen um die 40°C innerhalb der Verteilungen betragen. Basierend auf diesen Informationen wurde in Polysun ein Modell erstellt. Das Modell wird in der folgenden Abbildung 8 aufgezeigt.

Kessel: VITODENS 200-W Typ B2HA 20-99
Leistung: 99 kW

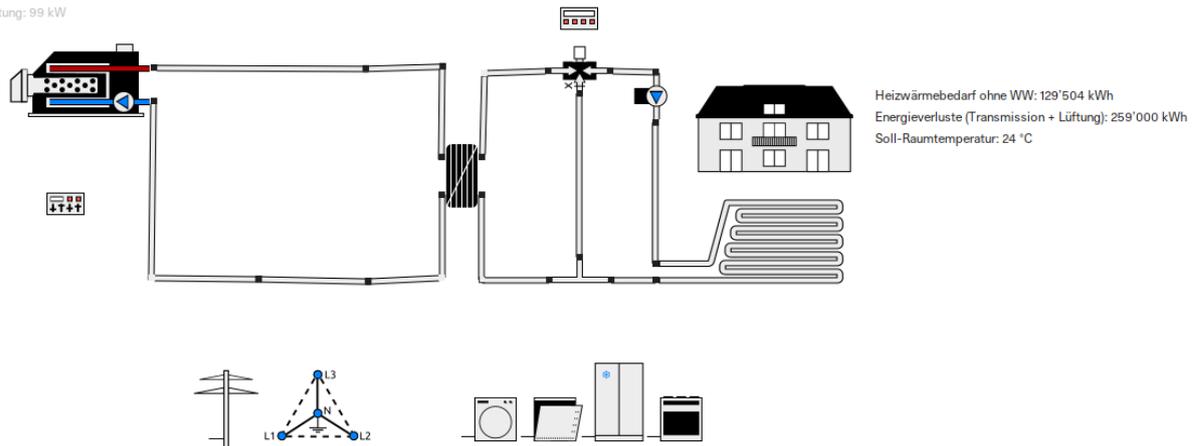


Abbildung 8: Polysun Modell der Referenzvariante mit einem Gaskessel ohne Pufferspeicher

Die Resultate sollen zum Vergleich der verschiedenen Varianten dienen. Die nachfolgende **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** stellt die wichtigsten Kennzahlen dar welche für den Vergleich der Varianten ausgewählt wurden. Die 75 kW Heizung kann den Energiebedarf vollständig abdecken. Es wird eine Nutzenergie in der Höhe von 128'612 kWh geliefert. Der gesamte Brennstoff- und Stromverbrauch beläuft sich auf 136'228kWh. Der Stromverbrauch basiert auf einer Annahme von 4'050 kWh pro Haushalt (EnergieSchweiz & Bundesamt für Energie BFE, 2021). Dies entspricht dem jährlichen Verbrauch einer 4-köpfigen Familie in einem Einfamilienhaus. So entsteht ein Stromverbrauch von 72'900 kWh. Dieser wird vollständig vom öffentlichen Stromnetz gedeckt. Der Stromverbrauch wurde so gewählt, da es sich bei den zu untersuchenden Liegenschaften um Eigentumswohnungen handelt. Somit besteht keine gemeinsame Waschküche oder ähnliches. Jede Liegenschaft verfügt über die eigenen Waschgeräte sowie die eigenen Warmwasseraufbereitung. Aus diesem Grund fällt der jährliche Stromverbrauch höher aus als bei einem Mehrfamilienhaus.

Tabelle 1: Simulationsergebnisse des Referenzmodells mit einer 75 kW Gasheizung

Kennzahl	Symbol	Wert
Nutzenergie [kWh]	Quse	128'612 kWh
Gesamter Energiebedarf	Qdem	129'504 kWh
Brennstoff und Stromverbrauch der Wärmeerzeuger [kWh]	Eaux	136'228 kWh
Gesamter Stromverbrauch [kWh]	Ecs	73'310 kWh
Netzbezug [kWh]	Efeg	73'310 kWh
Eigenverbrauch	Eocs	-
Eigenverbrauchsanteil [%]	Rocs	-
Autarkiegrad [%]	Raut	-
Systemjahresarbeitszahl	SPF-SHP	

Es gilt zu beachten, dass in dieser Variante, aufgrund der fehlenden Photovoltaikanlage kein Eigenverbrauchsanteil und auch kein Autarkiegrad ermittelt werden konnte. Aus diesem Grund wurden die Werte in der Tabelle leer gelassen.

Die Nutzwärme fällt in dieser Simulation geringer aus als der Energiebedarf. Dennoch konnte das Gebäude in der Simulation auf der geforderten Raumtemperatur gehalten werden. Der gesamte Brennstoff und Stromverbrauch behandelt lediglich den Gasverbrauch, dieser beläuft sich in diesem Modell auf 136'228 kWh. Der Gasverbrauch ist rund 6 % höher als der Nutzwärmeertrag. Die Differenz stammt vom Wirkungsgrad der Gasheizung sowie den Übertragungsverlusten im Wärmeverteilnetz.

Der gesamte Stromverbrauch beinhaltet die Haushaltsstromverbräuche von 72'900 kWh. Hinzu kommen noch die Stromverbräuche der Pumpen. Eine einzelne Pumpe benötigt rund 410 kWh Strom pro Jahr. Für die ganze Siedlung beläuft sich der Stromverbrauch der Pumpen also auf 7'380 kWh. Der gesamte Stromverbrauch beläuft sich somit auf 79'870 kWh welche komplett aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen werden. Das Modell konnte den Umstand der 18 Pumpen nicht abbilden. Deshalb beziehen sich die Zahlen in der Tabelle auf eine einzelne Pumpe.

4.2 Luft-Wasser Wärmepumpe und reine Stromerzeugungsanlage

In dieser Variante soll die Heizwärme einzig durch eine Luft-Wasser Wärmepumpe bereitgestellt werden. Das System soll nicht durch Hybridkollektoren unterstützt werden. Stattdessen wird die verfügbare Dachfläche für eine reine PV-Anlage verwendet. Die Wärmepumpe soll so weit wie möglich mithilfe des eigens produzierten Stroms betrieben werden. Das System liess sich wie in Abbildung 9 dargestellt in Polysun modellieren.

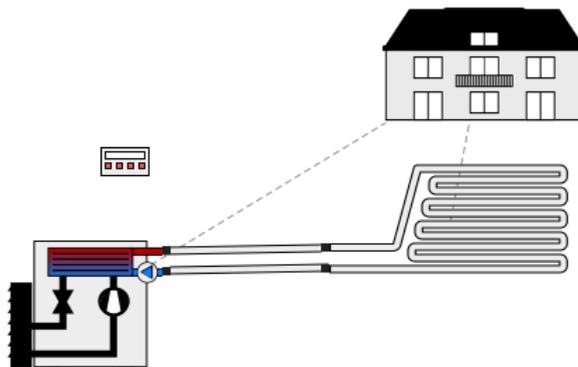
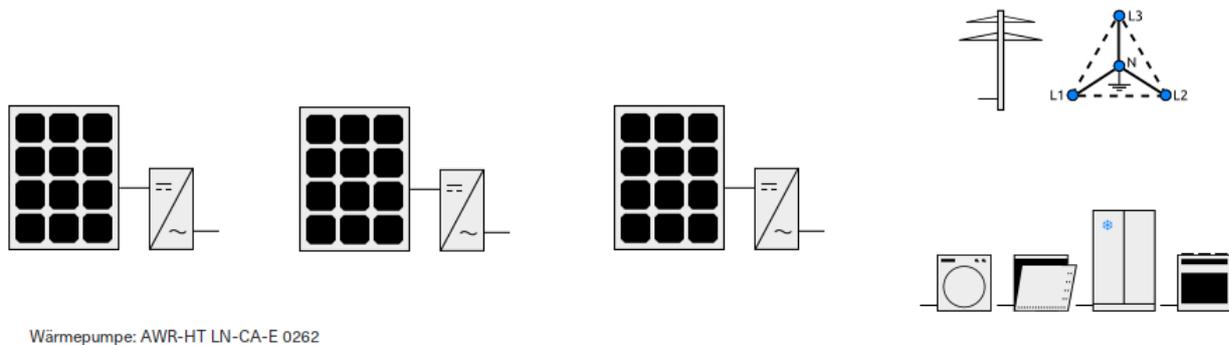


Abbildung 9: Polysun Modell mit einer Luft-Wasser Wärmepumpe und reiner PV-Anlage

Das Modell beinhaltet eine modulierbare Luft-Wärmepumpe. Durch den Einsatz einer modulierbaren Wärmepumpe entfällt die Notwendigkeit eines Pufferspeichers. Ältere Wärmepumpen verfügten nur über begrenzte Betriebszustände. Sie konnten im Teillastbetrieb und im Vollastbetrieb arbeiten. Modulierende Wärmepumpen können die Leistung stufenlos dem Bedarf anpassen. Dies sorgt für einen geringeren Energieverbrauch. Ausserdem kann die Wärmepumpe so länger am Stück betrieben werden was zu einem effizienteren Betrieb und weniger Verschleiss führt. Der Einsatz der modulierenden Wärmepumpe spart also die Investitionskosten für den Pufferspeicher und führt zu weniger Unterhalts- und Wartungskosten. Es kann aber auch keine Energie gespeichert werden. Ein Pufferspeicher kann aber problemlos nachgerüstet werden, falls dies gewünscht wird. Ausserdem wurde eine Photovoltaikanlage integriert, welche alle drei verfügbaren Dächer beinhaltet. So ergab sich eine Nenneleistung von 75 kW.

Tabelle 2: Simulationsresultate der Variante bestehend aus einer reinen Luft-Wasser Wärmepumpe inkl. Photovoltaikanlage

Kennzahl	Symbol	Wert
Nutzenergie [kWh]	Quse	128'836 kWh
Gesamter Energiebedarf	Qdem	129'504 kWh
Brennstoff und Stromverbrauch der Wärmeerzeuger [kWh]	Eaux	37'877 kWh
Gesamter Stromverbrauch [kWh]	Ecs	110'777 kWh
Netzbezug [kWh]	Efeg	78'242 kWh
Ertrag Photovoltaik AC	Qinv	69'817 kWh
Eigenverbrauch	Eocs	32'535 kWh
Eigenverbrauchsanteil [%]	Rocs	46.6 %
Autarkiegrad [%]	Raut	29.5 %
Systemjahresarbeitszahl	SPF-SHP	3.4

Auch in diesem Modell liegt die Nutzenergie etwas unter dem gesamten Energiebedarf. Dies ist auch hier nicht weiter schlimm. Verglichen mit dem Referenzsystem benötigt der Wärmeerzeuger deutlich weniger Energie. Es werden 37'877 kWh an Strom benötigt, um die gleiche Menge an Wärmeenergie bereitzustellen. Dies liegt an der effizienten Arbeitsweise der Wärmepumpe. Die Luft-Wärmepumpe weist eine Jahresarbeitszahl von 3.4 auf. Das bedeutet, dass aus einer Einheit Strom und 2.4 Einheiten Umweltwärme 3.4 Einheiten Heizwärme bereitgestellt werden konnte. Der produzierte Solarstrom kann ohne Optimierungen zu einem grossen Teil direkt verbraucht werden. In der Simulation beträgt der Eigenverbrauch rund 47 %. In der Realität, mit dem höheren Stromverbrauch aller 18 Umwälzpumpen wird dieser Wert noch höher ausfallen. Durch den hohen Eigenverbrauch kann verstärkt vom günstigen Solarstrom profitiert werden. Auch der Autarkiegrad liegt bei rund 30 %. Rund 30 % der jährlich benötigten Energie konnten also aus eigener Energieproduktion abgedeckt werden.

4.3 Sole-Wasser Wärmepumpe mit Hybridkollektoren und einer Photovoltaikanlage

Diese Variante beinhaltet ein Heizungssystem, welches auf Erdwärmesonden und einer Sole-Wasser Wärmepumpe basiert. Um eine frühzeitige und überdurchschnittliche Auskühlung des Erdreiches zu verhindern, soll der Boden mithilfe von Hybridkollektoren regeneriert werden. Das System soll in Polysun simuliert werden, um abzuschätzen, ob die überschlagsmässig berechnete Menge an Erdwärmesonden ausreichen oder ob sie sogar reduziert werden kann. Abbildung 11 zeigt wie das System in Polysun modelliert wurde.

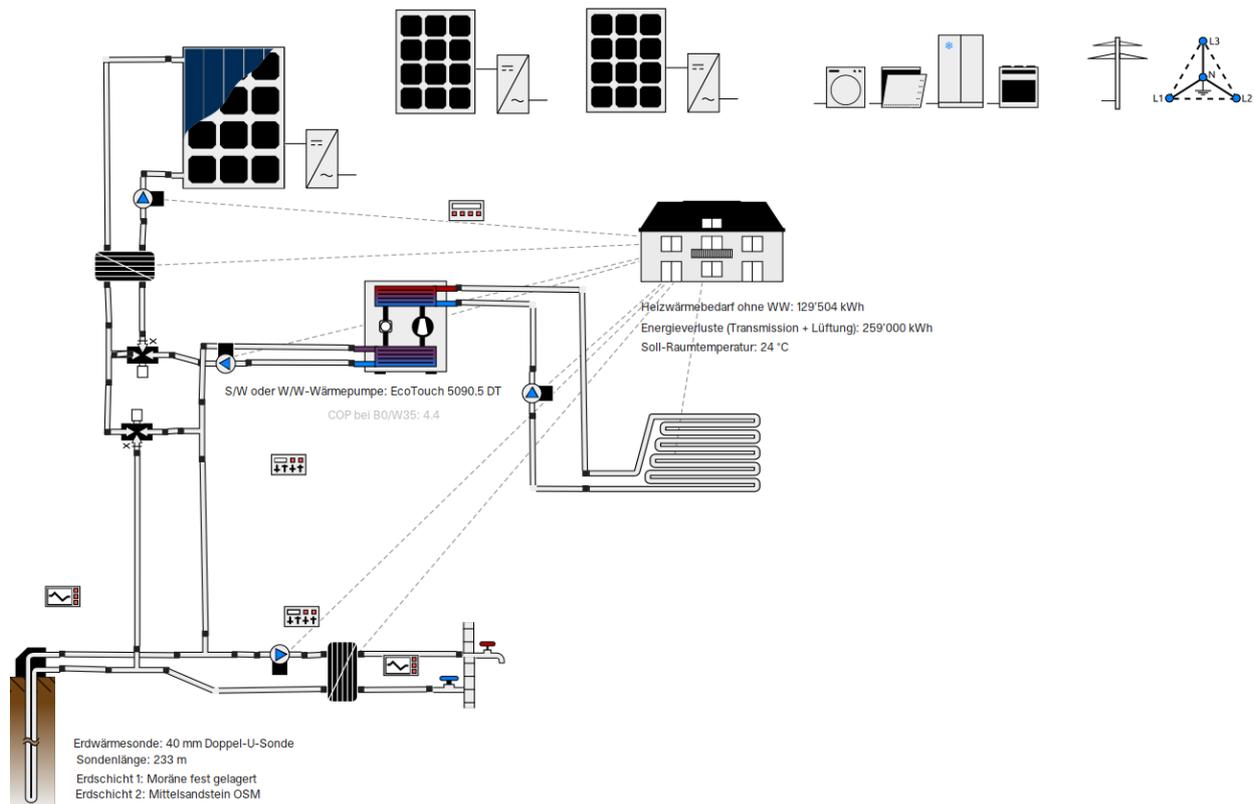


Abbildung 10: Polysun Modell mit Erdwärmesonden und PVT-Kollektoren und einer PV-Anlage

Das System mit den Erdwärmesonden und Hybridkollektoren ergänzt sich sehr gut. Im Winter wird die Heizwärme mithilfe der Erdwärmesonden und der Wärmepumpe bereitgestellt. Im Sommer können die Hybridkollektoren dazu genutzt werden die Erdwärmesonden zu regenerieren. Durch die Regeneration können die Erdwärmesonden stärker belastet werden was dazu führt, dass die totale Sondenlänge reduziert werden kann. Anhand der Simulation wurde herausgefunden, dass die Sondenlänge um rund 10 % reduziert werden kann und noch immer genügend Heizwärme bereitgestellt werden kann. Anstatt der 1'715 m könnten bereits 1'544 m genügen. Dies reduziert die Investitionskosten für die Sondenbohrung. Die folgende Tabelle 3 zeigt die Resultate aus den Polysun Simulationen.

Tabelle 3: Simulationsresultate der Variante bestehend aus 7 Erdwärmesonden einer Wärmepumpe und 1 Hybridkollektorfeld

Kennzahl	Symbol	Wert
Nutzenergie	Quse	128'706 kWh
Gesamter Energiebedarf	Qdem	129'504 kWh
Brennstoff und Stromverbrauch der Wärmeerzeuger	Eaux	30'199 kWh
Gesamter Stromverbrauch	Ecs	103'611 kWh
Netzbezug	Efeg	73'051 kWh
Ertrag Photovoltaik AC	Qinv	71'402 kWh
Eigenverbrauch	Eocs	30'560 kWh
Eigenverbrauchsanteil	Rocs	42.8 %
Autarkiegrad	Raut	28.7 %
Systemjahresarbeitszahl	SPF-SHP	4.3

Die Jahresarbeitszahl der Erdsonden-Wärmepumpe ist aufgrund der geringeren Temperaturunterschiede zwischen der Quelltemperatur und der Vorlauftemperatur noch höher als bei der Luft-Wärmepumpe. Somit ist auch der Energieaufwand zum Erzeugen der Heizwärme deutlich geringer. Um die gleiche Menge an Heizwärme bereitzustellen, benötigt die Erdsonden-Wärmepumpe rund 30'200 kWh elektrische Energie. Somit beläuft sich der gesamte Stromverbrauch der Siedlung und der Wärmeerzeugung auf 103'611 kWh. Auch hier gilt wieder zu beachten, dass der gesamte Stromverbrauch wieder höher ausfällt, da in der Simulation lediglich eine Pumpe dargestellt werden konnte. Davon können mehr als 40 % oder 30'560 kWh durch den eigens produzierten Solarstrom abgedeckt werden. Es müssen also noch 73'051 kWh aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen werden.

4.4 Sole-Wasser Wärmepumpe mit Hybridkollektoren

Das in diesem Kapitel beschriebene System ist dasselbe wie im vorherigen Modell. Verglichen mit dem vorangehenden Modell wurde hier aber die Solarstromanlage ausgelassen. So lassen sich Investitionskosten für das Gesamtsystem sparen. Abbildung 11 zeigt wie das System in Polysun modelliert wurde.

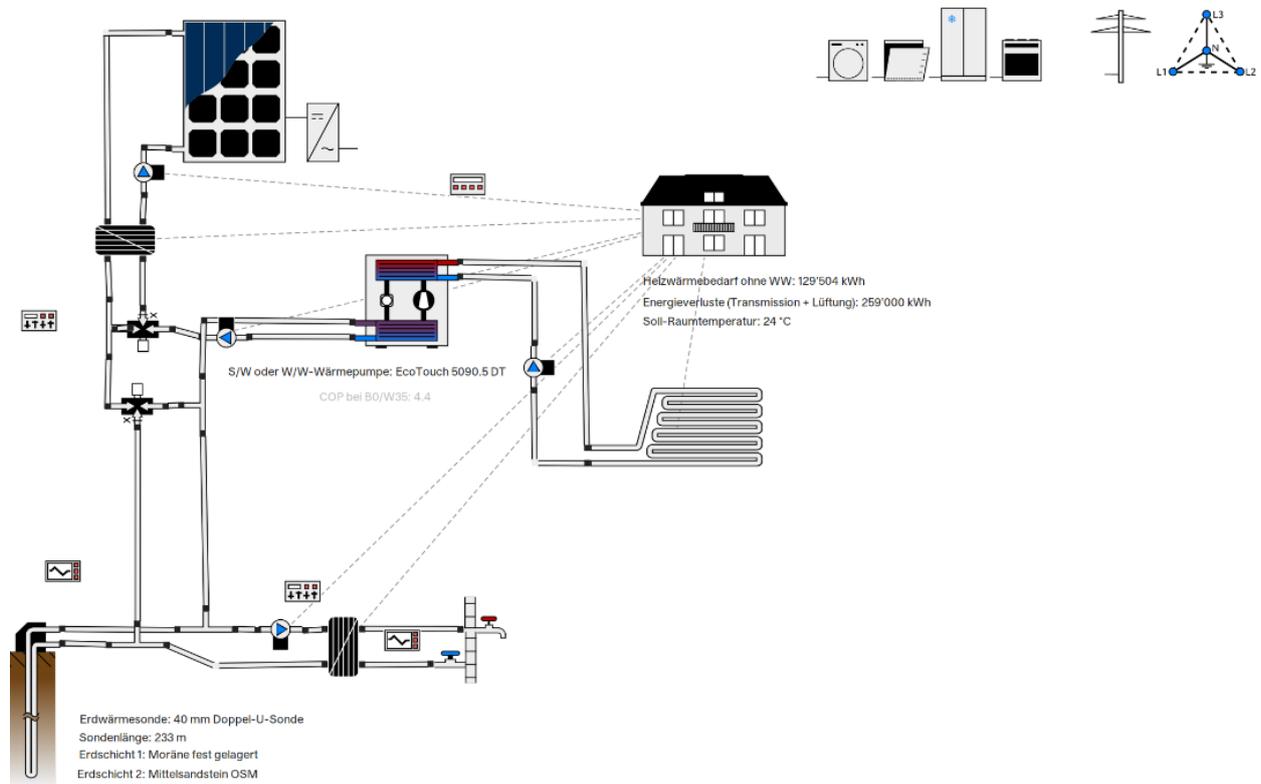


Abbildung 11: Polysun Modell mit Erdwärmesonden und PVT-Kollektoren

Diese Variante funktioniert also genau gleich wie das Vorgängermodell. Wie sich der Wegfall des zusätzlichen Solarstromertrags auswirkt, zeigt die folgende Tabelle 4,

Tabelle 4: Simulationsresultate der Variante bestehend aus 7 Erdwärmesonden einer Wärmepumpe und 1 Hybridkollektorfeld

Kennzahl	Symbol	Wert
Nutzenergie	Quse	128'799 kWh
Gesamter Energiebedarf	Qdem	129'504 kWh
Brennstoff und Stromverbrauch der Wärmeerzeuger	Eaux	29'832 kWh
Gesamter Stromverbrauch	Ecs	103'230 kWh
Netzbezug	Efeg	84'708 kWh
Ertrag Photovoltaik AC	Qinv	23'322 kWh
Eigenverbrauch	Eocs	18'424 kWh
Eigenverbrauchsanteil	Rocs	79 %
Autarkiegrad	Raut	17.6 %
Systemjahresarbeitszahl	SPF-SHP	4.3

Die Ergebnisse zur Nutzenergie sind praktisch identisch wie das Modell mit einer Solarstromanlage. Da in diesem Modell aber lediglich die Hybridkollektoren Stromerzeugen fällt der Solarstromertrag deutlich geringer aus. Der produzierte Strom kann aber fast vollständig selbst verbraucht werden. Rund 79 % oder 18'424 kWh können direkt verbraucht werden. Der gesamte Stromverbrauch mit nur einer Pumpe beläuft sich auf 103'230 kWh von 84'708 kWh aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen werden müssen.

Tabelle 5: Simulationsresultate der Variante "Bivalent" bestehend aus Erdwärmesonden und einem Luft-Wärmetauscher

Kennzahl	Symbol	Wert
Nutzenergie	Quse	128'796 kWh
Gesamter Energiebedarf	Qdem	129'504 kWh
Brennstoff und Stromverbrauch der Wärmeerzeuger	Eaux	30'257 kWh
Gesamter Stromverbrauch	Ecs	107'529 kWh
Netzbezug	Efeg	76'609 kWh
Ertrag Photovoltaik AC	Qinv	69'797 kWh
Eigenverbrauch	Eocs	30'920 kWh
Eigenverbrauchsanteil	Rocs	44.3 %
Autarkiegrad	Raut	28.6 %
Systemjahresarbeitszahl	SPF-SHP	4.3

Neben den Pumpen der Heizverteilung muss in diesem System zusätzlich noch der Rückkühler der Luft-Wärmepumpe betrieben werden, welche die Erdsonden regeneriert. Aus diesem Grund fällt der gesamte Stromverbrauch etwas höher aus. Das System arbeitet allerdings genau so effizient wie die anderen Varianten, welche auf einer Erdsonden-Wärmepumpe basieren. Dadurch, dass in diesem alle Dächer vollständig mit Solarstromanlagen bedeckt werden können, erhöht sich auch der Solarstromertrag und der Eigenverbrauch. Knapp 31'000 kWh des produzierten Solarstromes kann direkt verbraucht werden. Es müssen folglich nur 76'609 kWh aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen werden.

4.6 Fazit

Die aus den Simulationen resultierenden Resultate sollen in den folgenden Kapiteln miteinander verglichen werden. Sie dienen schlussendlich als Grundlage für die Wirtschaftlichkeitsberechnung und für die Nutzwertanalyse.

4.6.1 Gesamter Brennstoff und Stromverbrauch der Wärmeerzeuger

Die folgende Abbildung 13 zeigt die Strom- und Brennstoffverbräuche der verschiedenen Varianten auf. Wie zu erwarten war weist die Luft-Wärmepumpe der Variante «LW-WP mit PV» den höchsten Stromverbrauch auf. Dies aufgrund der geringeren Jahresarbeitszahl welche typisch ist für Luft-Wärmepumpen. Den geringsten Stromverbrauch weisen die beiden Varianten mit der Erdwärmesonde aus. Die Variante «Bivalent» weist einen leicht höheren Stromverbrauch aus. Dies liegt am Betrieb des Rückkühlers.

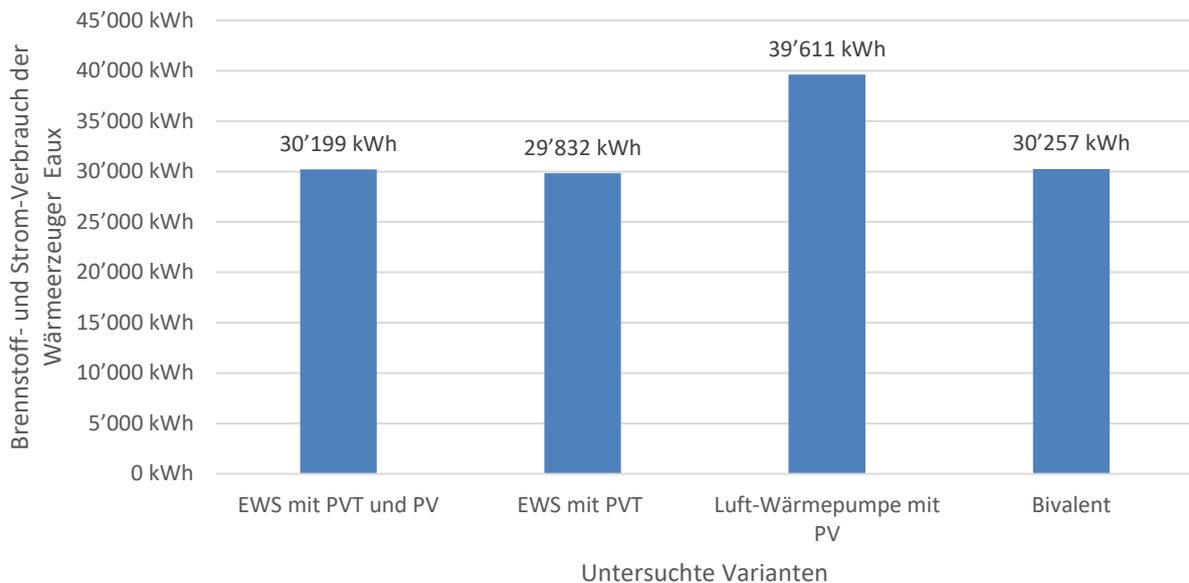


Abbildung 13: Brennstoff- und Stromverbrauch der Wärmeerzeuger der untersuchten Varianten

Die Unterschiede zwischen den drei Varianten Erdwärmesonden mit PVT mit und ohne PV sowie Bivalent sind nicht besonders gross. Somit könnten Sie zu einem kleinen Teil aus unterschiedlichen Simulationsparametern stammen.

4.6.2 Netzbezug

Auch der Netzbezug ist eine relevante Kennzahl beim Vergleich verschiedener Modelle. Schlussendlich bedeutet ein niedrigerer Netzbezug auch geringere Nebenkosten. Die folgende Abbildung 14 vergleicht die Netzbezüge der verschiedenen Varianten.

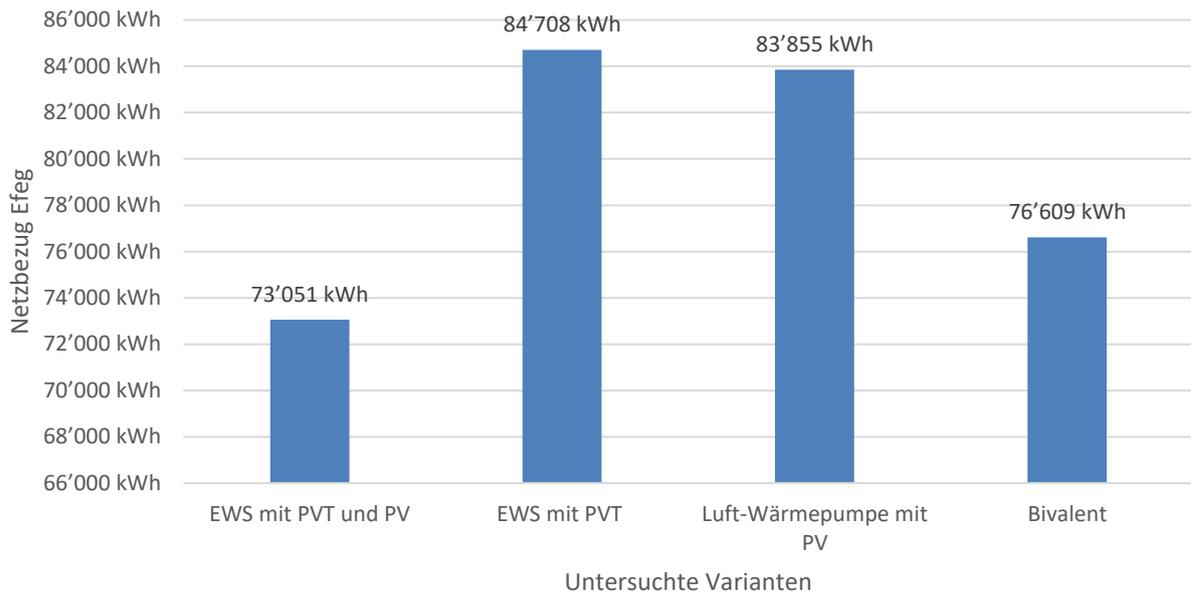


Abbildung 14: Netzbezug der untersuchten Varianten

Die Varianten mit einer grossen Photovoltaikanlage erzielen in diesem Vergleich die besten Resultate. Aufgrund der geringeren Stromverbräuche im Betrieb sind auch die Netzbezüge der Variante «EWS mit PVT und PV» am geringsten. Einen nur leicht höheren Netzbezug erreicht die Variante «Bivalent» und den grössten Netzbezug hat die Variante «EWS mit PVT». Das ist allerdings nicht verwunderlich. Schliesslich wurde bei dieser Variante keine zusätzliche Photovoltaikanlage vorgesehen.

5 Vorprojekt – Konkretisierung

In diesem Kapitel wurde mithilfe der Simulationsresultate und den daraus gewonnenen Ergebnissen sowie der in der Ist-Situationsanalyse berechneten Norm-Heizlast das Vorprojekt und die Varianten konkretisiert.

Anhand einer Literaturrecherche sowie Abklärungen bei Lieferanten und Handwerkern wurden passende Produkte und Komponenten ausgewählt.

Anhand der Komponenten sollte die Machbarkeit der Variante ein weiteres Mal beurteilt werden. Falls eine Komponente aufgrund der Grösse nicht auf dem Grundstück verortet werden kann, so muss die Variante verworfen werden. In diesem Kapitel wurde darauf verzichtet das Referenzmodell weiter zu verfeinern. Schlussendlich wurde es lediglich zum Vergleich im Polysun modelliert.

5.1 Luft- Wasser Wärmepumpe

Gemäss einer Studie des Bundesamtes für Energie sind Luft-Wasser Wärmepumpen in Wohnbauten die am meisten zugebaute erneuerbare Heizung (Hefti & Marti, 2022). Allerdings nur in kleineren Anlagen bis 50 kW. Mittelgrosse Anlagen von 50 kW bis 120 kW werden nur sehr wenige zugebaut. Dies hat oftmals die folgenden Gründe:

- Fehlende Verfügbarkeit von Standardanlagen
- Fehlender Platz im Heizungsraum besonders im städtischen Gebiet
- Schallemissionen von mittelgrossen Luft-Wasser Wärmepumpen

Aus diesem Grund werden bei mittelgrossen Anlagen ähnlich wie Sie an der Houelbachstrasse gefordert sind immer noch viele fossile Heizungen durch fossile Heizungen ersetzt.

Es gibt aber auch Lösungsansätze für den Heizungsersatz durch Luft-Wasser Wärmepumpen. Zum einen ist es möglich, Standardanlagen mit kleiner Leistung in Kaskade zu verwenden. Dabei werden mehrere Standardanlagen mit einer entsprechenden Regelungstechnik verbunden. So können bis zu mehreren Hundert Kilowatt an Leistung erbracht werden. Eine weitere Lösung ist der Bau und die Entwicklung von individuellen Spezialanlagen. Die Dritte Möglichkeit für einen Heizungsersatz ist der Einsatz von Produkten aus der Kältetechnik, reversible Anlagen, Kaltwassersätze (Hefti & Marti, 2022).

Da es keine Standardgeräte mit einer Heizleistung von 75 kW auf dem Markt gibt, muss eine Lösung wie oben beschrieben gefunden werden.

5.1.1 Spezialanfertigung Luft-Wasser Wärmepumpe

Die geeignetste Lösung für die Houelbachstrasse wäre eine Spezialanlage, welche speziell für die Siedlung konzipiert wurde. So kann den speziellen Gegebenheiten betreffend der Wärmeverteilung Rechnung getragen werden. Solche Anlagen erfordern aber einen grossen Engineering Anteil und sind folglich sehr teuer. Allerdings sind sie aufgrund der höheren Planungsaufwände oftmals weniger fehleranfällig. Die Firma CTA könnte für den Bau einer Spezialanlage engagiert werden.

5.1.2 Kaskadenanlage - CTA «Aeropro AP CP 45a»

Auch eine Kaskadenanlage wäre denkbar. Allerdings werden mindestens zwei aussenaufgestellte Standardgeräte benötigt. Diese müssen auf dem Gelände der Houelbachstrasse verortet werden. Dies verursacht zum einen eine erhöhte Lärmbelastung aber es bedingt auch grössere Aufwände bei der hydraulischen Einbindung der verschiedenen Geräte in den Heizkreis.

Die Firma CTA ist ein Hersteller welcher Wärmepumpen in vielen verschiedenen Grössen und Ausführungen anbietet. Die aussenaufgestellte Wärmepumpe vom Typ «Aeropro AP CP 45a» wäre eine Option, um eine Kaskadenanlage zu realisieren. Die Wärmepumpe erbringt beim Arbeitspunkt A-7/W35 eine Heizleistung von 23.8 kW mit einem Verdichter. Mit zwei Verdichtern sind es 38.9 kW. Somit könnte mit zwei Geräten eine Heizlast von knapp 78 kW erreicht werden. Es wäre also möglich die Siedlung mit nur zwei aussenaufgestellten Geräten zu beheizen. Ein einzelnes Gerät hat die folgenden Masse: Tiefe = 0.85 m, Breite = 2.32 m und Höhe = 1.8 m. Die Geräte sind sehr gross und müssen auf dem Gelände der Siedlung und möglichst in der Nähe der Heizleitungen installiert werden. Um einen störungsfreien und effizienten Betrieb zu gewährleisten, muss das Gerät einen bestimmten Abstand zur Fassade haben. Sie können also nicht direkt an die Wand gebaut werden.

5.1.3 Fazit Luft-Wärmepumpen

Von den drei möglichen Lösungsvorschlägen aus der Studie des Bundesamtes für Energie wurden die zwei gängigsten in dieser Arbeit besprochen. Es wurde der Bau einer Spezialanlage diskutiert. Diese müsste bei einem Anbieter in Auftrag gegeben werden.

Ausserdem wurde die Möglichkeit einer Kaskadenanlage erörtert. Dazu wurde ein passendes Gerät der Firma CTA gefunden welches alle Anforderungen an die Leistung, sowie die entsprechenden Regelungen erfüllt. Eine Luft-Wasser Wärmepumpe wäre also durchaus umsetzbar. Für die Umsetzung der Kaskadenanlage muss abgeklärt werden, wo die Geräte platziert werden können und dürfen sodass die geforderten Lärmschutzgrenzen eingehalten werden können. Da die Kosten für eine Kaskadenanlage besser abschätzbar sind als für eine

Spezialanlage wurde in den folgenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen eine solche Anlage betrachtet.

Aufgrund der Lärmproblematik wäre eine innenaufgestellte Anlage zu bevorzugen. Dies ist allerdings nur mit einer Spezialanlage möglich. Es muss genau abgeklärt werden welche Kosten beim Bau und bei der Entwicklung einer solchen Spezialanlage entstehen. Am Ende muss anhand eines Kostenvoranschlags das Kosten/Nutzen-Verhältnis einer solchen Lösung abgeklärt werden. Die Variante sollte dann auch mit den verbliebenen Varianten verglichen werden.

5.2 Sole – Wasser Wärmepumpe mit PVT-Kollektoren

Sole-Wasser Wärmepumpen im geforderten Leistungsbereich sind einfacher ausfindig zu machen. Die meisten gängigen Hersteller bieten Geräte an, welche die geforderte Heizlast sogar überschreiten.

Für die weitere Arbeit wurde das Modell «Optiheat Duo OH 1-85e» von der Firma CTA ausgewählt. Die in den kommenden Kapiteln erstellte Wirtschaftlichkeitsberechnung wird sich also auf diese Anlage beziehen. Welche Anlage schlussendlich ausgewählt wird soll erst im Bauprojekt definiert werden.

Die Auswahl eines passenden Lieferanten muss bei einer sorgfältigen Umsetzung anhand von eingeholten Offerten und allgemeinen Eindrücken der Handwerksfirma geschehen.

Für die PVT-Kollektoren wird davon ausgegangen, dass die im Kapitel 3.1.4 Kollektoren von der Firma Consolar verwendet werden. Auch hier steht die Wahl des Herstellers wieder frei.

5.3 Bivalentes System - EWS und Luft-Wasser Wärmepumpe

Für die Variante «Bivalent» soll dieselbe Sole-Wärmepumpe wie bereits im vorangegangenen Kapitel beschrieben verwendet werden. In dieser Variante sollen aber nicht Hybrid-Kollektoren verwendet werden, um die Erdwärmesonden zu regenerieren, sondern ein sogenannter «Terra-Booster». Beim Terra-Booster handelt es sich um eine 9 kW Luft-Wärmepumpe, welche im Sommer und in der Übergangszeit die Erdwärmesonden regeneriert und gleichzeitig zur Warmwasseraufbereitung sowie zur Heizungsunterstützung verwendet werden kann. Kostenpunkt für einen einzelnen Terra-Booster mit einer Leistung von 9 kW liegt bei rund 10'000 CHF.

Für die Berechnungen und Simulationen wurden 2-mal 9 kW für rund 20'000 CHF gewählt.

6 Vorprojekt – Wirtschaftlichkeitsberechnung

Um für die Eigentümerschaft eine nützliche Entscheidungsgrundlage zu erarbeiten, reicht es nicht aus lediglich die verschiedenen Potenziale und Varianten zu beschreiben und zu simulieren. Für die Entscheidungsfindung sind auch die Kosten sehr relevant. Aus diesem Grund wurde für die verschiedenen Varianten eine Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt. Dazu wurden teilweise Richtpreise von Herstellern und Installateuren eingeholt. Da es sich dabei lediglich um Richtpreise handelt wurden einige bauseitige Leistungen nicht deklariert. In solchen Fällen wurde auf die Referenzwerte eines Ingenieurbüros zurückgegriffen. Darin sind beispielsweise Grabarbeiten für die Zuleitungskanäle der Erdwärmesonden enthalten aber auch Elektroarbeiten und Arbeiten an der Wärmeverteilung innerhalb des Heizungsraums.

Es ergaben sich realistische Schätzungen. Da es sich aber lediglich um Richtpreise handelte musste von einer Unsicherheit von $\pm 25\%$ ausgegangen werden. Alle Kosten in dieser Arbeit sind exkl. Mehrwertsteuer zu verstehen.

Mithilfe der Polysun Simulationen wurden dann die Betriebs- und Unterhaltskosten berechnet, welche pro Jahr entstehen. Die Wirtschaftlichkeit wurde pro Variante mithilfe der Annuitätenmethode berechnet. Dabei werden die jährlichen Kosten für Unterhalt und Betrieb, Energiekosten sowie Kapitalkosten berücksichtigt. Aus den so entstehenden jährlichen Kosten konnte der spezifische Wärmepreis berechnet werden. Dieser gibt an, wie viel eine Kilowattstunde Wärme aus der entsprechenden Variante kostet.

Da ein Heizungsersatz in den meisten Fällen keine gewinnbringende Investition ist, fällt die Berechnung der Rendite oder Amortisationszeit sehr schwer. Aus diesem Grund wurde das neue Heizungssystem mit einem 1:1 Ersatz der Gasheizung verglichen. Verglichen mit dem Status Quo ist ein erneuerbarer Heizsystem, trotz den sehr hohen Investitionskosten langfristig eine wirtschaftlich bessere Lösung. Es wurden also die effektiven Kosten des jetzigen Systems mit den Kosten der verschiedenen Varianten verglichen. So liess sich erkennen, wie schnell eine neue Heizung durch die Einsparungen der Nebenkosten amortisiert würde.

Zusätzlich wurde eine Wirtschaftlichkeitsberechnung für die verschiedenen Solarstromanlagen erstellt. Diese Berechnungen sollten aufzeigen, dass die Solarstromanlagen nicht nur die Kosten der einzelnen Varianten in die Höhe treiben, sondern auch einen wirtschaftlichen Mehrwert ganz für sich erzielen können.

6.1 Begriffserklärung

In der Wirtschaftlichkeitsberechnungen wurden einige Begriffe eingeführt, welche in den folgenden Absätzen kurz erklärt werden.

Kapitalkosten

In den kommenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen werden die Kapitalkosten als Kennzahl angegeben. Es wird davon ausgegangen, dass die Komponenten wie Heizungen oder Wechselrichter am Ende Ihrer Lebensdauer ersetzt werden müssen. Um diesen Ersatz zu finanzieren, müssen Geldmittel angespart werden. Diese Spareinlage müssen Sie jährlich beiseitelegen und steht Ihnen somit nicht zur Verfügung. Die Kapitalkosten beziehen sich also auf diese Spareinlage und die daraus resultierenden Opportunitätskosten. Die Kapitalkosten müssen Sie also nicht bezahlen. Sondern Ihnen entgehen Gewinne und Renditen, da Sie das Geld nicht gewinnbringend anlegen können. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung wurde von einem Kapitalzinssatz von 2 % ausgegangen.

Unterhaltskosten

Unterhaltskosten sind tatsächliche Kosten welche jährlich anfallen. Sie beziehen sich auf den Unterhalt und die Wartung des System. Je komplexer ein System ist, desto störungsanfälliger und folglich unterhaltsintensiver ist es. Die Unterhaltskosten wurden basierend auf Erfahrungswerten abgeschätzt.

Energiekosten

Die Energiekosten sind selbsterklärend. Es sind die Kosten, welche für den Einkauf von Energie bezahlt werden müssen. Aktuell wird Gas eingekauft, um Wärme zu erzeugen. Mit den erneuerbaren Alternativen wird Strom eingekauft. Für die Wirtschaftlichkeit sollte eine vernünftige Annahme zu den Preisentwicklungen der Energiepreise mit einberechnet werden. Die letzten Jahre zeigten aber, wie volatil der Energiemarkt ist und wie stark sich Energiepreise bereits innerhalb eines Jahres verändern können. Die Gaspreise im Versorgungsgebiet Kriens haben im allein im letzten Jahr um rund 50 % zugenommen (Energie Wasser Luzern, 2022). Auch die Strompreise sind davon betroffen. In den letzten 5 Jahren blieben die Strompreise im Versorgungsgebiet stabil. Im Jahr 2023 sollen die Strompreise der ewl aber um bis zu 20 % ansteigen (Eidgenössische Elektrizitätskommission, 2022). In der aktuellen Situation kann also nur schwer abgeschätzt werden, wie sich die Preise entwickeln, ob die Gaspreise wieder sinken werden und in welchem Ausmasse die Strompreise noch ansteigen werden. Es wurde also der Status Quo abgebildet.

Spezifische Wärmekosten

Mit der Annuitätenmethode lassen sich die verschiedenen Varianten sehr gut anhand der jährlichen Kosten vergleichen. Eine weitere Kennzahl zum Vergleich der Varianten stellen die spezifischen Wärmekosten dar. Diese sagen aus, zu welchem Preis eine Kilowattstunde Wärme

produziert wird. Folglich lassen sich die Nebenkosten für die Bewohner anhand Ihrer bisherigen Verbräuche berechnen. Je tiefer die spezifischen Wärmekosten, desto geringer die Nebenkosten.

Nettoarwert

Der Nettoarwert ist eine weitere wirtschaftliche Kennzahl, welche in den folgenden Kapiteln eingefügt wird. Beim Nettoarwert handelt es sich um die Summe aller Erträge und Einsparungen einer Investition, welche durch den verwendeten Kapitalzins von 2 % abgezinst wurden. Die Entscheidung zum tätigen einer Investition kann basierend auf dem Nettoarwert getroffen werden. Ist der Nettoarwert grösser als die initialen Investitionen so handelt es sich um eine lukrative Investition. Je höher der Nettoarwert, desto besser.

6.2 Luft-Wärmepumpe mit PV

Als erstes wurde die Luft-Wärmepumpe betrachtet. Die Investitionskosten belaufen sich bei dieser Variante auf insgesamt 336'100 CHF. Der Ersatz der Heizung verursacht Kosten in der Höhe von 204'000 CHF und die enthaltene Solarstromanlage kostet 132'100 CHF. Der Ersatz einer Gas- oder Ölheizung wird vom Kanton Luzern gefördert. Es können Fördergelder in der Höhe von 10'000 CHF beantragt werden. Auch der Bau der Solarstromanlage wird auf Bundesebene von der Pronovo gefördert. Für die Anlage mit einer Nennleistung von 75 kWp kann eine kleine Einmalvergütung in der Höhe von 24'600 CHF beantragt werden. Somit belaufen sich die Nettoinvestitionen wie in der folgenden Abbildung 15 gezeigt auf 301'500 CHF.

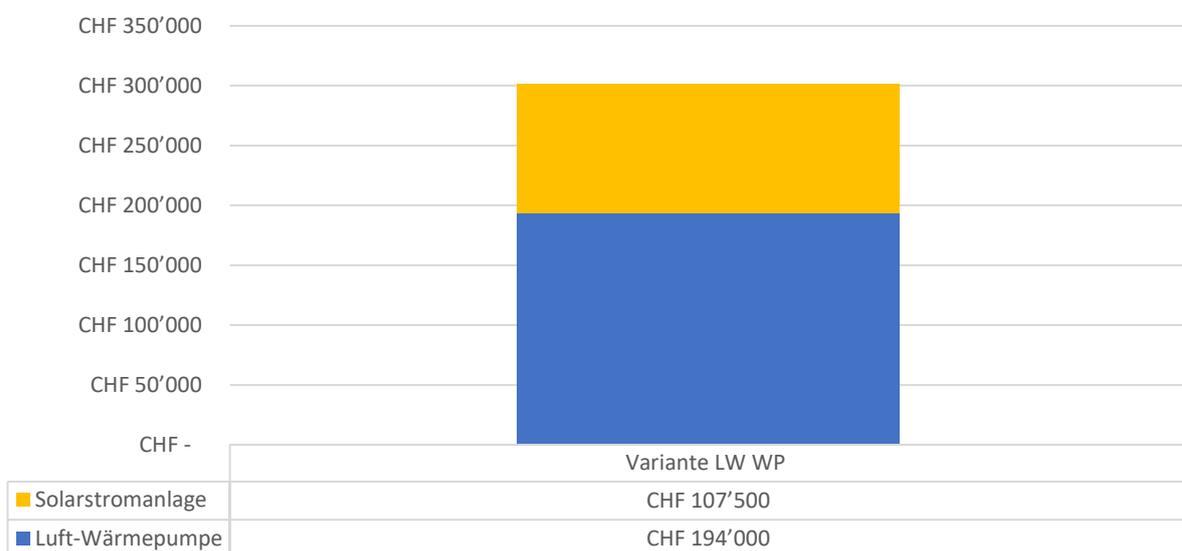


Abbildung 15: Nettoinvestitionen für die Variante Luft-Wärmepumpe mit PV-Anlage

Neben den Fördergeldern können noch weitere Einsparungen gemacht werden. Investitionen an der eigenen Liegenschaft können von den Steuern abgezogen werden. Zur Steueroptimierung könnte das Energiekonzept gestaffelt realisiert werden. So kann im ersten Jahr die Heizung ersetzt werden und im nächsten Jahr die Solarstromanlage gebaut werden. Die Einsparungen

der Steuern sind sehr individuell und wurden deshalb nicht in die Wirtschaftlichkeit integriert. Für einen Investitionsentscheid ist dieser Umstand aber dennoch relevant.

Nach den Investitionskosten sind auch die Betriebskosten respektive die kompletten jährlichen Kosten relevant. Diese setzen sich zusammen aus den Kapitalkosten wie sie in Kapitel 6.1 beschrieben wurden. Ausserdem die Unterhalts- und Betriebskosten sowie die Energiekosten. Die jährlichen Kosten belaufen sich auf rund 29'100 CHF und sind wie in der Abbildung 16 gezeigt zusammengesetzt.

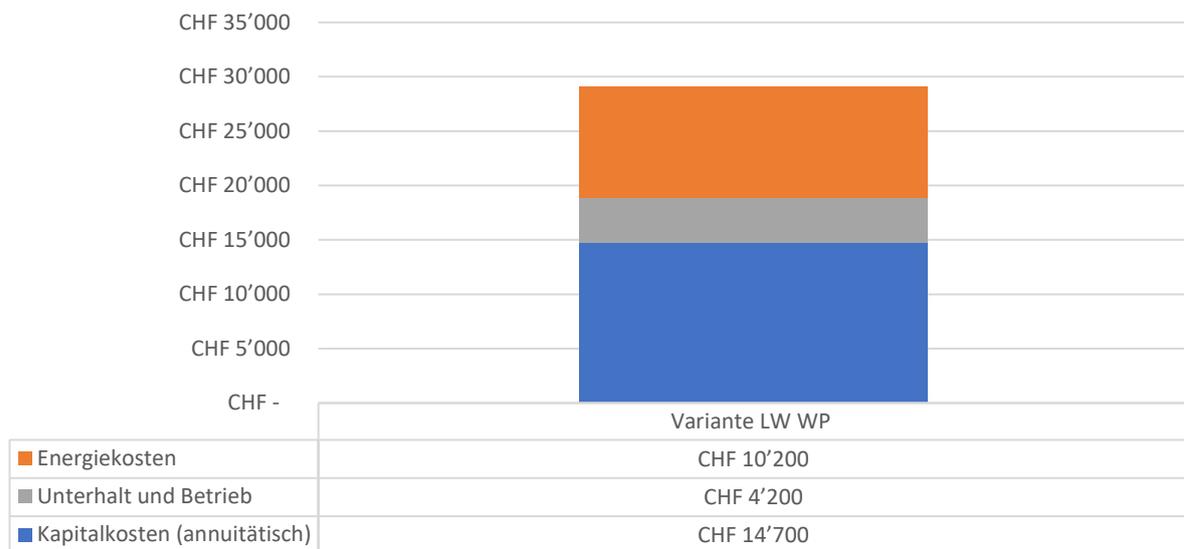


Abbildung 16: Jährliche Kosten der Variante Luft-Wärmepumpe mit PV-Anlage

Für die Wärmeerzeugung wurden rund 39'600 kWh benötigt. Mit den Strompreiserhöhungen ab 01.01.2023 führt dies zu Kosten in der Höhe 10'200 CHF. Die Unterhaltskosten für die Wärmeerzeugung und die Solarstromanlage belaufen sich auf jährlich rund 4'200 CHF. Mithilfe dieser jährlichen Kosten lassen sich die spezifischen Wärmekosten berechnen. Diese belaufen sich auf 22.5 Rp./kWh. Die jährlichen Kosten für das Referenzsystem belaufen sich auf durchschnittlich rund 39'500 CHF. Die spezifischen Wärmekosten betragen so 30.6 Rp./kWh. Basierend auf den Einsparungen gegenüber dem Status Quo sowie den Erträgen aus dem Stromverkauf konnte die Wirtschaftlichkeit über einen Zeitraum von 30 Jahren der Anlage berechnet werden. Die Anlage weist eine Amortisationsdauer von rund 24 Jahren auf. Die jährlichen Einsparungen im Betrieb der Anlage belaufen sich im Fall der Luft-Wärmepumpe auf rund 10'500 CHF. Durch den Eigenverbrauch des Solarstrom können ebenfalls Nebenkosten gespart werden. Diese belaufen sich auf jährlich 3'870 CHF. Es kann nur ein Teil des produzierten Stroms direkt verbraucht werden. Der Rest wird ins öffentliche Stromnetz eingespeist und verkauft. Dies ergibt Erträge in der Höhe von rund 4'800 CHF. Aufgrund dieser Aufwände und Erträge beläuft sich der Nettobarwert nach 30 Jahren auf 121'700 CHF.

Die wichtigsten Kennzahlen zur variante Luft-Wärmepumpe finden Sie in der nachfolgenden Tabelle 6.

Tabelle 6: Wirtschaftliche Kennzahlen der Variante Luft-Wärmepumpe mit PV-Anlage

Kennzahl	Wert
Nettoinvestitionskosten	301'500 CHF
Jährliche Kosten	29'100 CHF
Spezifische Wärmekosten	22.5 Rp./kWh
Amortisationsdauer	24 Jahre
Nettobarwert nach 30 Jahren	121'700 CHF

6.3 EWS mit PVT und PV

Die Variante EWS mit PVT basiert auf einer Erdsonden-Wärmepumpe mit Hybridkollektoren zur Regeneration der Erdwärmesonden. Verglichen mit einer Luft-Wärmepumpe sind die Erdsonden-Wärmepumpen bedeutend teurer. Dies liegt daran, dass neben den Wärmeerzeugern auch die Erdwärmesonden erstellt werden müssen. Die Bruttoinvestitionskosten belaufen sich auf 424'100 CHF. Auch für diese Variante können Fördergelder beansprucht werden. Für den Ersatz der Gasheizung durch eine Erdsonden-Wärmepumpe werden vom Kanton Luzern 26'500 CHF an Fördergeldern gesprochen. Auch für die Hybridkollektoren gibt es eine kantonale Förderung. Vom Kanton erhält die Bauherrschaft 4'000 CHF. Die Hybridkollektoren werden aber auch von der Pronovo gefördert. Von der Pronovo kann die kleine Einmalvergütung von 6'320 CHF beantragt werden. Somit entstehen Nettoinvestitionen in der Höhe von 369'300 CHF. Die nachfolgende Abbildung 17 zeigt, wie die Investitionskosten aufgeteilt sind. Die Wärmeerzeugung selbst kostet rund 166'900 CHF. Die dazugehörige PVT-Anlage, welche zur Regeneration benötigt wird kostet 74'100 CHF. Ausserdem kostet die 50 kWp Solarstromanlage auf den restlichen Dächern rund 72'100 CHF. Es müssen noch weitere Aufwände für die Installationen der Anlagen und ggf. Ein Ingenieurbüro miteinbezogen werden. Diese Kosten belaufen sich auf rund 56'200 CHF

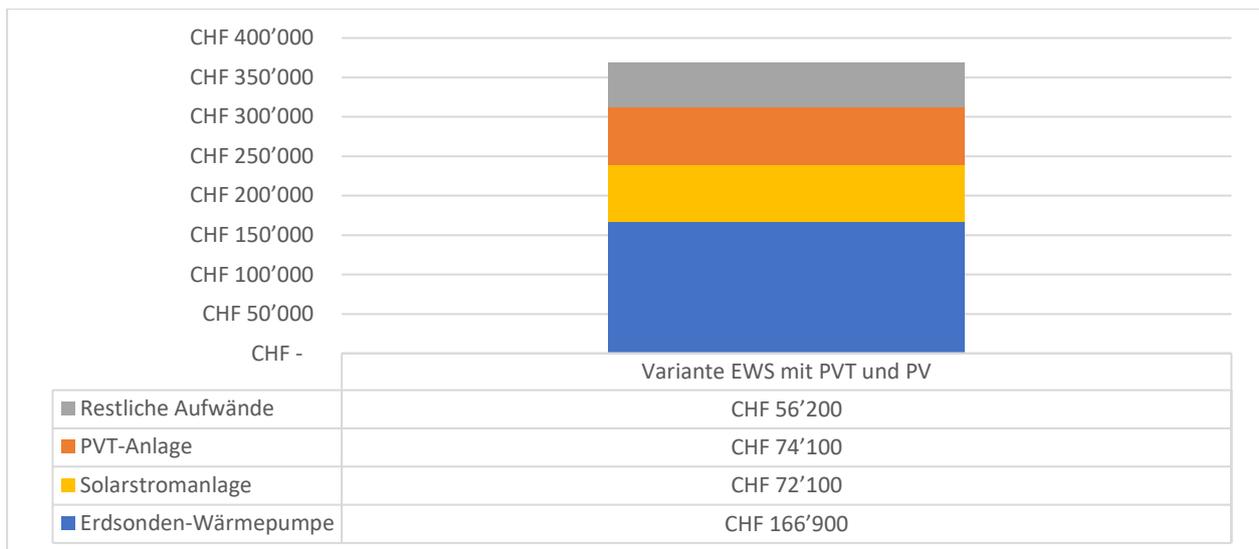


Abbildung 17: Nettoinvestitionskosten der Variante EWS mit PVT und PV

Die höheren Investitionskosten werden durch die geringeren jährlichen Kosten relativiert. Diese werden in der Abbildung 18 aufgezeigt.

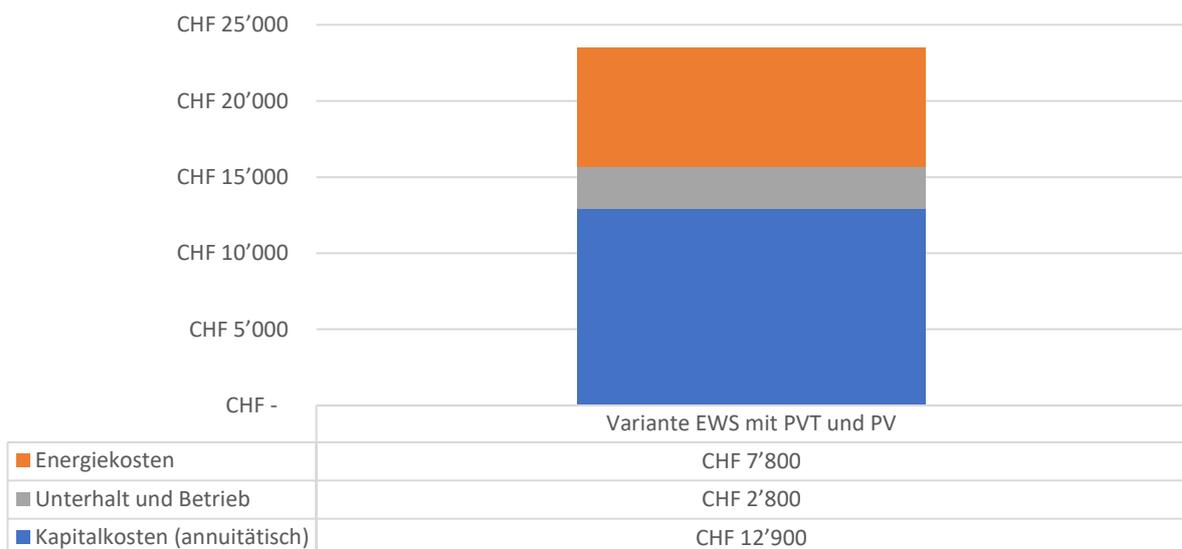


Abbildung 18: Jährliche Kosten der Variante EWS mit PVT und PV

Die Erdsonden-Wärmepumpe weist aufgrund der höheren Jahresarbeitszahl einen geringeren Stromverbrauch auf. Die jährlichen Kosten belaufen sich auf insgesamt 23'500 CHF. Davon sind 7'800 CHF Energiekosten, welche für die jährlich rund 30'200 kWh Strom bezahlt werden müssen, welche die Wärmepumpe für die Wärmeerzeugung benötigt. Aufgrund der hohen Investitionskosten sind auch die Kapitalkosten hoch. Mithilfe der jährlichen Kosten konnten die spezifischen Wärmekosten dieser Variante berechnet werden. Diese belaufen sich auf 18.1 Rp./kWh. Die Variante weist eine Amortisationsdauer von 15 Jahren auf. Der Nettobarwert beträgt nach 30 Jahren rund 307'900 CHF. Verglichen mit dem Status Quo entstehen jährliche Einsparungen durch die Heizung von rund 16'000 CHF. Ausserdem werden durch den

Eigenverbrauch des Solarstroms Nebenkosten in der Höhe von jährlich 3'828 CHF eingespart. Der restliche Solarstrom wird an die ewl verkauft was Erträge in der Höhe von 4'850 CHF erzielt. Wiederum wurden die wichtigsten Kennzahlen in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet.

Kennzahl	Wert
Nettoinvestitionskosten	369'300 CHF
Jährliche Kosten	23'500 CHF
Spezifische Wärmekosten	18.1 Rp./kWh
Amortisationsdauer	15 Jahre
Nettobarwert nach 30 Jahren	307'900 CHF

6.4 EWS mit PVT

In dieser Variante wurde die Solarstromanlage weggelassen. Dies führt dazu, dass die Brutto-Investitionskosten bedeutend geringer ausfallen als bei den übrigen Varianten. Die Bruttoinvestitionskosten belaufen sich auf 334'000 CHF. Abzüglich der Fördergelder muss mit Nettoinvestitionskosten in der Höhe von 297'200 CHF gerechnet werden. Die Zusammensetzung dieser Investitionskosten kann der nachfolgenden Abbildung 19 entnommen werden. Dabei belaufen sich die Kosten für das Bohren der Erdwärmesonden und der dazugehörigen Wärmepumpe auf rund 166'900 CHF. Die Hybridkollektoren kosten rund 74'100 CHF. Die restlichen Arbeiten wie das Verlegen von Heizleitungen im Heizungsraum, Planungshonorare oder ähnliches wurde in den restlichen Arbeiten zusammengefasst. Diese Kosten belaufen sich auf rund 56'200 CHF.

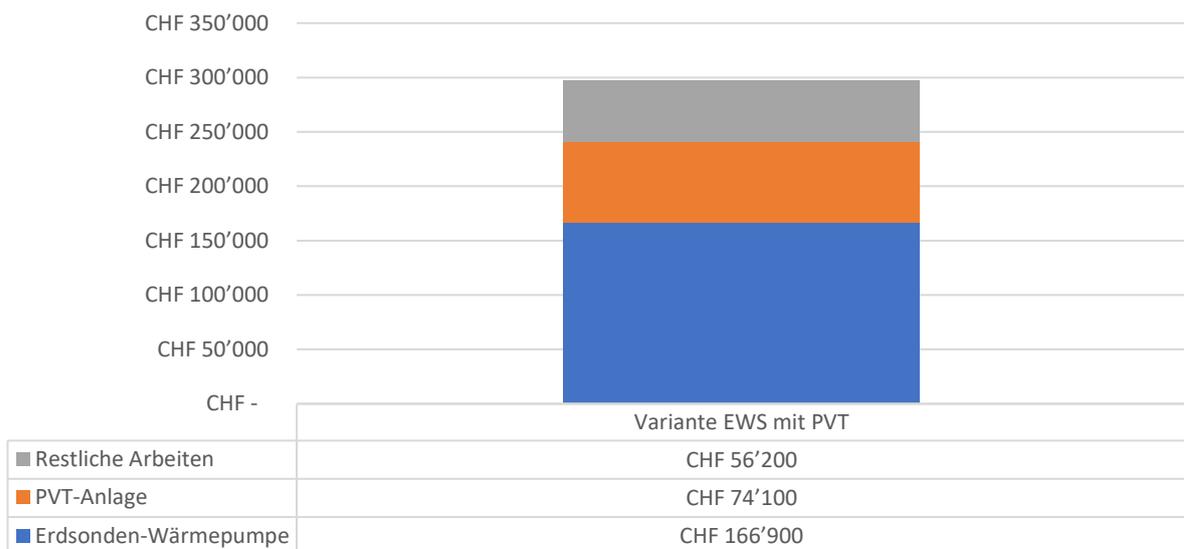


Abbildung 19: Nettoinvestitionskosten der Variante EWS mit PVT

Dadurch dass keine Solarstromanlage im Konzept enthalten ist, fallen weniger Kapital- und Unterhaltskosten an. Die jährlichen Kosten belaufen sich so auf 23'200 CHF. Diese setzen sich wie in der Abbildung 20 gezeigt zusammen.

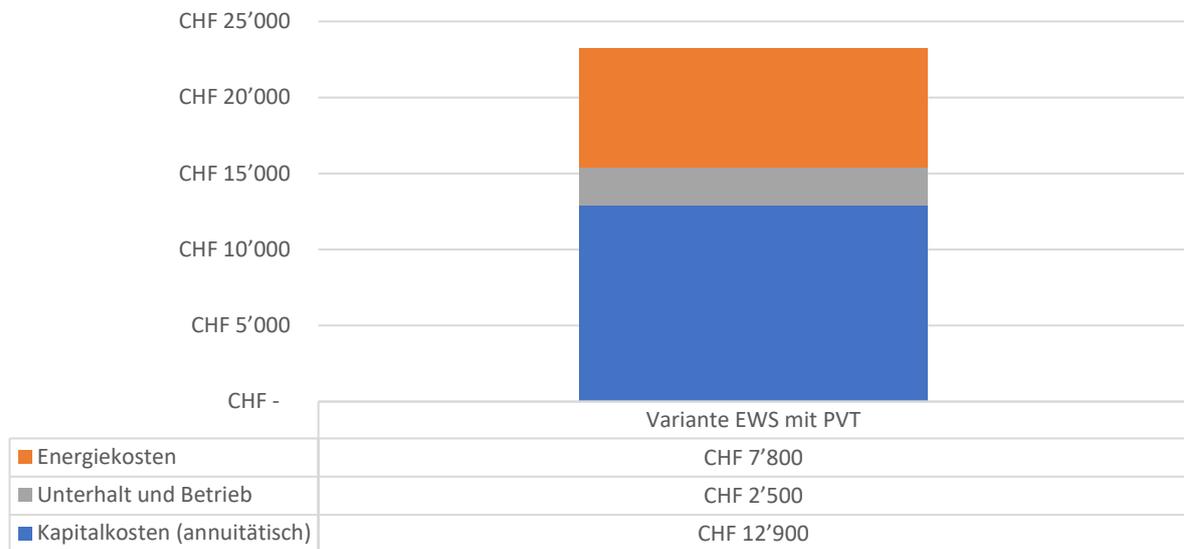


Abbildung 20: Jährliche Kosten der Variante EWS mit PVT

Die Energiekosten fallen gleich hoch aus wie die Energiekosten der vorangehenden Variante. Die Betriebs- und Unterhaltskosten fallen leicht geringer aus da der Unterhalt der Solarstromanlage entfällt. Auch die Kapitalkosten sind deutlich geringer. Basierend auf diesen jährlichen Kosten konnte ein spezifischer Wärmepreis von 17.9 Rp./kWh berechnet werden. Die produzierte Wärme ist also leicht günstiger als in der vorangehenden Variante. Verglichen mit dem Referenzsystem entstehen Einsparungen bei den Heizkosten von rund 16'300 CHF. Die Einsparungen durch den Eigenverbrauch des Solarstroms fällt geringer aus. Durch den Eigenverbrauch entstehen Einsparungen in der Höhe von rund 2'000 CHF. Ein kleiner Teil des produzierten Solarstroms wird an die ewl verkauft. So entstehen Erträge in der Höhe von jährlich 440 CHF. Der Nettobarwert nach 30 Jahren beträgt 201'800 kWh. Es ergibt sich eine Amortisationsdauer von 16 Jahren. Die wichtigsten Kennzahlen wurden in der Tabelle 7 zusammengefasst

Tabelle 7: Wirtschaftliche Kennzahlen der Variante EWS mit PVT

Kennzahl	Wert
Nettoinvestitionskosten	297'200 CHF
Jährliche Kosten	23'200 CHF
Spezifische Wärmekosten	17.9 Rp./kWh
Amortisationsdauer	20 Jahre
Nettoabarwert nach 30 Jahren	201'800 CHF

6.5 Bivalent

Die Variante «Bivalent» besteht aus einer Erdsonden-Wärmepumpe und zwei Terra-Boostern. Ähnlich wie die Hybridkollektoren regeneriert der Terra-Booster die Erdwärmesonden und sorgt dafür, dass weniger Sondenmeter benötigt werden. Die Bruttoinvestitionskosten belaufen sich auf 421'100 CHF. Auch für diese Variante können Fördergelder gültig gemacht werden. Dies führt zu den folgenden Nettoinvestitionskosten. Wie in Abbildung 21 gezeigt kostet die Wärmeerzeugung 262'500 CHF. Die Solarstromanlage kostet rund 107'500 CHF.

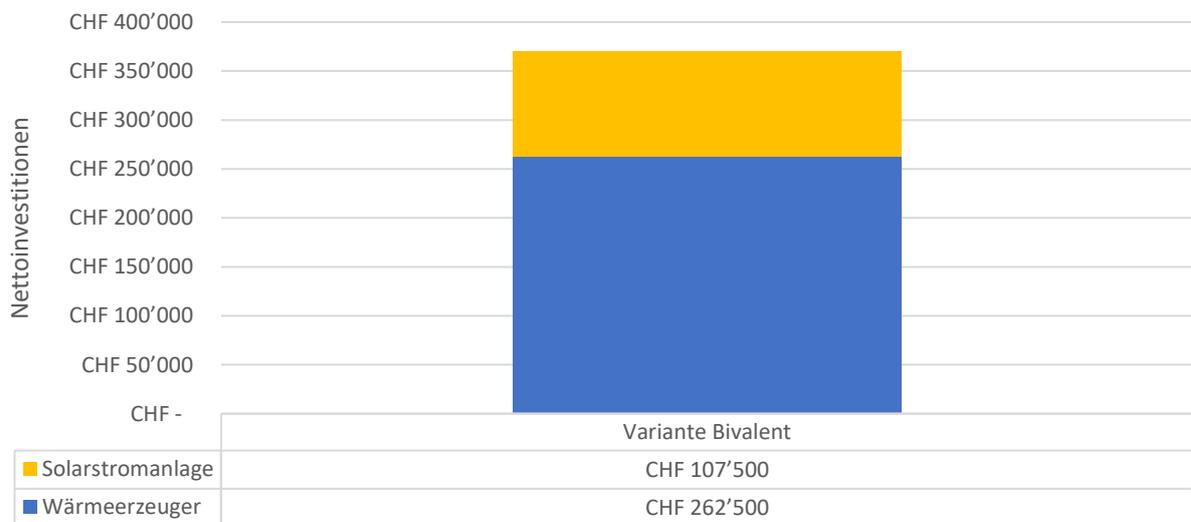


Abbildung 21: Nettoinvestitionskosten für die Variante "Bivalent"

Für die bivalente Variante entstehen jährliche Kosten in der Höhe von 25'300 CHF. Diese setzen sich wie nachfolgend beschrieben zusammen.

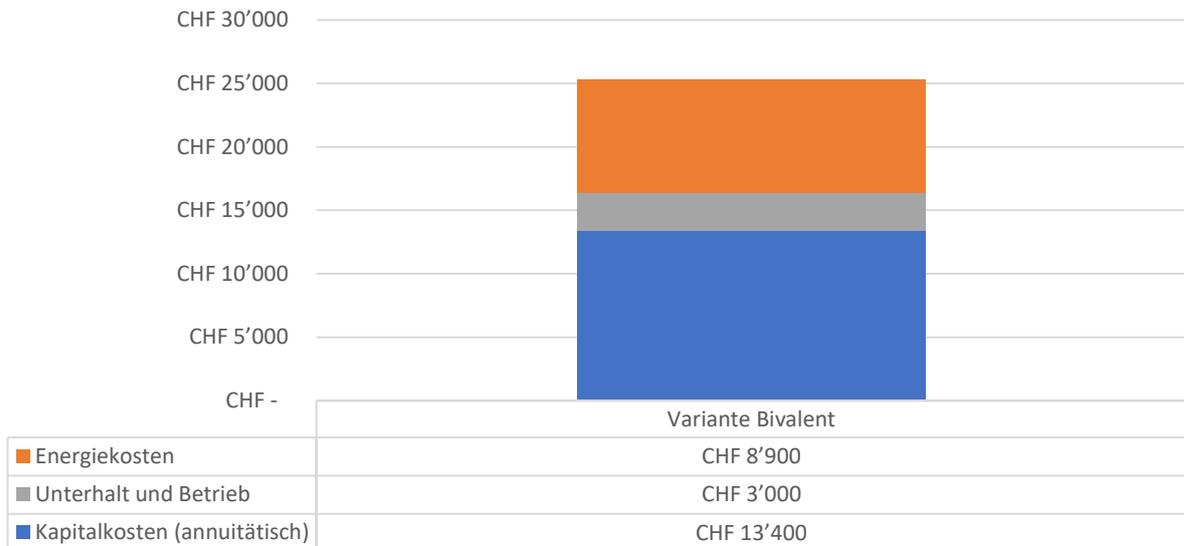


Abbildung 22: Jährliche Kosten für die Variante "Bivalent"

Aufgrund der hohen Investitionskosten entstehen sehr hohe Kapitalkosten. Auch die Betriebs- und Unterhaltskosten belaufen sich auf 3'000 CHF. Das System mit den Terra-Boostern ist komplexer. Bei den Terra-Boostern handelt es sich um eine Luft-Wärmepumpe, welche in das System eingebunden werden muss. Aufgrund dieser jährlichen Kosten entstehen spezifische Wärmekosten in der Höhe von 19.5 Rp./kWh. Die Amortisationsdauer liegt bei rund 17 Jahren und der Nettobarwert nach 30 Jahren liegt bei 234'500 CHF. Durch das neue Heizsystem können Nebenkosten in der Höhe von rund 14'300 CHF eingespart werden. Durch den Eigenverbrauch des Solarstroms können Nebenkosten in der Höhe von 4'012 CHF gespart werden. Der restliche Solarstrom wird wiederum an die ewl verkauft, was zu Erträgen in der Höhe von 4'700 CHF führt. So ergeben sich die wirtschaftlichen Kennzahlen wie sie in der Tabelle 8 beschrieben wurden.

Tabelle 8: Wirtschaftliche Kennzahlen der Variante Bivalent

Kennzahl	Wert
Nettoinvestitionskosten	370'000 CHF
Jährliche Kosten	25'300 CHF
Spezifische Wärmekosten	19.5 Rp./kWh
Amortisationsdauer	17 Jahre
Nettobarwert nach 30 Jahren	234'500 CHF

6.6 Solarstromanlage 75 kWp

Die Varianten «Luft-Wärmepumpe» und «Bivalent» verfügen beide über eine Solarstromanlage, welche alle drei verfügbaren Dächer bedeckt. Dabei belaufen sich die Kosten für eine solche Anlage auf jeweils 132'100 CHF Brutto oder abzüglich der Fördergelder auf 107'500 CHF. Auch bei dieser Investition muss bedacht werden, dass die Investitionskosten für die Solarstromanlage von den Steuern abgezogen werden könnte. So ergeben sich noch Steuererleichterungen, welche die Wirtschaftlichkeit der Anlage noch verbessern. In den vorangehenden Kapiteln wurde bereits aufgezeigt, wie sich die Solarstromanlagen auf die Wirtschaftlichkeit des Energiekonzepts auswirken. In diesem Kapitel soll noch zusätzlich auf die Wirtschaftlichkeit der Solarstromanlage allein eingegangen werden. Es sollte aufgezeigt werden, dass die Solarstromanlage nicht nur die Kosten in die Höhe treibt, sondern auch unabhängig vom restlichen Energiekonzept eine lukrative Investition ist. Die Wirtschaftlichkeit der Solarstromanlage basiert auf zwei Komponenten. Den Einsparungen durch den Verbrauch des günstigeren Solarstroms sowie den Erträgen aus dem Verkauf des Solarstroms an ein Energieversorgungsunternehmen. Die Einsparungen durch den Eigenverbrauch belaufen sich bei einem Eigenverbrauchsanteil von 46 % oder 29'000 kWh auf rund 3'870 CHF. Der restliche Strom also 35'470 kWh werden an die ewl verkauft. Bei einer Rüchspeisevergütung von 14 Rp./kWh führt dies zu Erträgen in der Höhe von 4'800 CHF. Basierend auf diesen Kennzahlen ergibt sich eine dynamische Amortisationszeit von rund 16 Jahren. Dies entspricht einer dynamischen Rendite von 4.5 %. Der Nettobarwert nach 30 Jahren beträgt also rund 79'000 CHF. Es handelt sich also um eine gewinnbringende Investition. Die wichtigsten Kennzahlen wurden in der folgenden Tabelle 9 nochmals zusammengefasst.

Tabelle 9: Wirtschaftliche Kennzahlen der 75 kWp Solarstromanlage für die Varianten "Luft-Wärmepumpe" und "Bivalent"

Kennzahl	Wert
Nettoinvestitionskosten	107'500 CHF
Durchschnittlicher Solarstromertrag (25 Jahre)	64'504 kWh
Amortisationsdauer	16 Jahre
Rendite	4.5 %
Nettobarwert nach 30 Jahren	79'000 CHF

6.7 Solarstromanlage 50 kWp

Auch die restlichen Varianten basierend auf einer Erdsonden-Wärmepumpe mit Hybridkollektoren können mit einer Solarstromanlage erweitert werden. Diese Solarstromanlage fällt etwas kleiner aus, da ein Dach für die Hybridkollektoren verwendet werden muss. Dennoch stellt die Nutzung der verbleibenden Dächer eine gute Investition dar. Genau wie bei der vorangehenden Solarstromanlage sind wiederum die Einsparungen durch den Eigenverbrauch sowie die Erträge durch den Verkauf des überschüssigen Solarstroms ausschlaggebend. Es gilt zu beachten, dass kleinere Anlagen oftmals ein wirtschaftlich schlechteres Ergebnis liefern als grössere Anlagen. Dies liegt an gleichbleibenden Kosten wie die Gerüste oder die Projektleitung. Sie fallen in derselben Höhe an wie bei grösseren Anlagen aber der Solarertrag ist geringer. Dennoch stellt auch der Bau der Anlage mit 50 kWp eine lohnende Investition dar. Es können Stromkosten in der Höhe von 2'546 CHF gespart werden. Der restliche Solarstrom wird an die ewl für jährlich 1'823 CHF verkauft. So ergeben sich die wirtschaftlichen Kennzahlen wie sie in der folgenden aufgezeigt werden. Selbst

Tabelle 10: Wirtschaftliche Kennzahlen der 50 kWp Solarstromanlage für die Varianten mit Erdsonden-Wärmepumpen und PVT-Kollektoren

Kennzahl	Wert
Nettoinvestitionskosten	72'100 CHF
Durchschnittlicher Solarstromertrag (25 Jahre)	43'000 kWh
Amortisationsdauer	23 Jahre
Rendite	3.9 %
Nettobarwert nach 30 Jahren	20'500 CHF

7 Vorprojekt – Varianten Bewertung

In diesem Kapitel sollen die ausgearbeiteten Varianten bewertet werden. Dazu kommen die im vorherigen Kapitel berechneten Daten zum Einsatz. Mithilfe einer Nutzwertanalyse sollen die Varianten miteinander verglichen werden. Um die Nutzwertanalyse möglichst reproduzierbar und für aussenstehende nachvollziehbar zu gestalten, basiert die Bewertung auf verschiedenen Nutzwertfunktionen. Dabei wurden den Kennzahlen wie den Investitionskosten Werte von 0-1 basierend auf der Höhe der Investitionskosten zugeteilt.

Die Nutzwertanalyse behandelte dabei 3 verschiedene Szenarien mit verschiedenen Gewichtungen. Bei jedem Szenario steht ein anderer Aspekt im Vordergrund. Die verschiedenen Faktoren sind die Wirtschaftlichkeit der Anlagen. Die ökologische Beurteilung der Anlage aber auch die Benutzerfreundlichkeit und die Komplexität des Systems.

7.1 Aufbau der Nutzwertanalyse

Die drei Szenarien unterscheiden sich dabei in Ihrer Gewichtung der verschiedenen Faktoren. Die Faktoren sind die Wirtschaftlichkeit, die Ökologie sowie der Komfort des Systems.

In jedem Szenario wurde je ein Faktor stärker gewichtet als der andere.

Die drei Szenarien heissen:

- «Enkelkindertauglich» Gewichtung auf Ökologie
- «Gäbige Sach» Gewichtung auf Komfort
- «Hinten rechts» Gewichtung auf Ökonomie

Die Kriterien, welche für jede Variante betrachtet wurden, waren die folgenden.

- **Ökonomische Aspekte**
 - Investitionskosten
 - Wartungs- und Betriebskosten
 - Spezifische Wärmekosten
- **Ökologische Aspekte**
 - CO₂-Emissionen im Betrieb der Heizung
 - Geruchs- und Lärmemissionen
 - Herkunft der Energieträger
 - Graue Energie
- **Komfort**
 - Bedienungsfreundlichkeit
 - Handhabung der Brennstoffe
 - Lokales Service Angebot
 - Fehleranfälligkeit

Da die Beurteilung der Kriterien nicht einfach willkürlich erfolgen konnte wurden für die verschiedenen Kriterien Nutzwertfunktionen erarbeitet. Mithilfe dieser liessen sich die Varianten einfacher und vor allem reproduzierbar bewerten, was zu einer transparenten Beurteilung führt. Die Gesamte Nutzwertanalyse, inkl. der Nutzwertfunktionen wurden dieser Arbeit angehängt.

7.2 Gewichtungen der Nutzwertanalyse

Wie bereits erwähnt wurden die verschiedenen Aspekte je nach Szenario unterschiedlich gewichtet. Nachfolgend werden die Gewichtungen der einzelnen Kriterien für das bessere Verständnis aufgelistet. Natürlich wurden auch die Unterkategorien wiederum gewichtet für das Verständnis der Auswertung sind diese aber nicht so ausschlaggebend. Die Gewichtung der Unterkategorien kann der Nutzwertanalyse entnommen werden.

Tabelle 11: Gewichtung der drei Aspekte in den verschiedenen Szenarien

Kriterium	«Enkelkindertauglich»	«Gäbigi Sach»	«Hinten rechts»
Ökonomie	30 %	20 %	60 %
Ökologie	60 %	20 %	20 %
Komfort	10 %	60 %	20 %
Total	100 %	100 %	100 %

7.3 Resultate der Nutzwertanalyse

Als erstes wurde das Szenario «Enkelkindertauglich» untersucht. Die Vergleiche der Zielerreichungsgrade sind in der Abbildung 23 ersichtlich. Mit einem Zielerreichungsgrad von 67 % schneidet hier die Variante mit der Erdwärmesonde und PVT-Kollektoren am besten ab. Auf dem zweiten Platz, mit einem Zielerreichungsgrad von 62 %, folgt die Variante Erdwärmesonde und PVT-Kollektoren mit Photovoltaikanlagen auf den restlichen Dächern ab. Auf dem dritten Platz folgt das Bivalente System mit Erdwärmesonde und Terra-Booster. Sie erreicht allerdings nur noch einen Zielerreichungsgrad von 53 %.

Die Variante «EWS mit PVT» konnte hier besonders durch die geringeren Aufwände von grauer Energie Punkte sammeln. Einzig bei der Herkunft der Brennstoffe respektive der Energieträger liegt die Variante «EWS mit PVT» hinter der Variante mit einer Solarstromanlage. Durch den geringen Solarstromertrag muss mehr Strom vom Netz bezogen werden was zu höheren Umweltbelastungen führt. Die Variante «EWS mit PVT» konnte diesen Umstand aber kompensieren indem Sie in anderen Kategorien wie dem Komfort oder der Ökonomie besser bewertet wurde. Mit einem Zielerreichungsgrad von 53 % liegt die Variante «Bivalent» weit hinter den anderen Varianten. Die Variante hat in diesem Szenario sehr viele Punkte verloren da im Betrieb auch der Rückkühler des Terra-Booster miteinberechnet werden musste, was zu einem höheren Stromverbrauch führte. Durch den Betrieb der kleinen Luft-Wärmepumpe entstanden zusätzliche Umweltbelastungen. Die Luft-Wärmepumpe verursacht im Betrieb höhere Umweltbelastungen als eine Erdsonden-Wärmepumpe. Durch den hohen Solarstromertrag konnte dies aber weitgehend kompensiert werden. Die Variante «LW WP mit PV» scheitert also nur bedingt an den ökologischen Faktoren. Sie erzielte auch in den restlichen Kategorien weniger Punkte und erreicht somit nur einen Zielerreichungsgrad von 41 %.

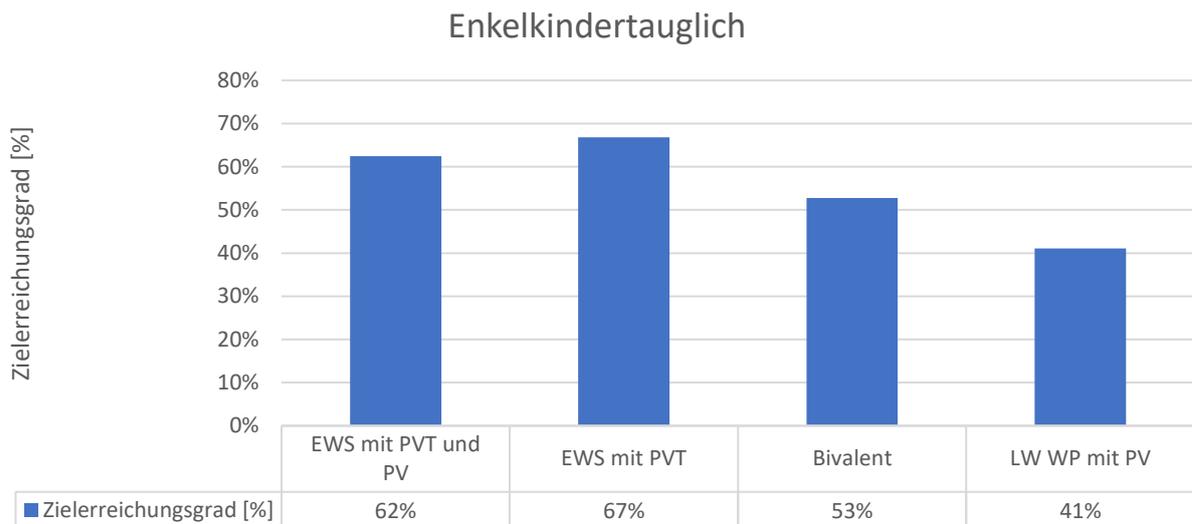


Abbildung 23: Vergleich der Zielerreichungsgrade im Szenario "Enkelkindertauglich"

Als zweites wurde das Szenario «Gäbigi Sach» betrachtet. Der Fokus hier liegt auf dem Komfort und der Benutzerfreundlichkeit der Anlage. Hier spielt besonders die Einfachheit des Systems eine Rolle. Wirtschaftliche und ökologische Aspekte wurden gleichermassen gewichtet. Die Resultate der Auswertung sind in der Abbildung 24 dargestellt.

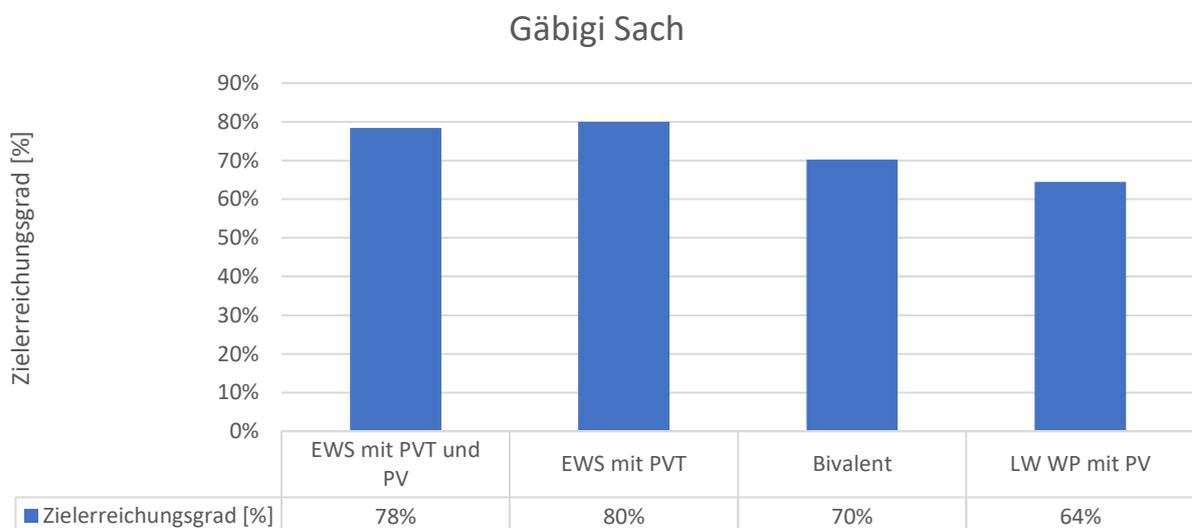


Abbildung 24: Vergleich der Zielerreichungsgrade im Szenario "Gäbigi Sach"

Wiederum schneidet die Variante «EWS mit PVT» mit einem Zielerreichungsgrad von 80 % am besten ab. Allerdings liegt der Vorsprung zum zweiten Platz, der Variante «EWS mit PVT und PV» nur bei 2 %-Punkten. Mit 10 %-Punkten Rückstand folgt die Variante «Bivalent» auf dem dritten Platz. Auf dem letzten Platz die Variante «LW WP mit PV» mit einem Zielerreichungsgrad von 64 %. Was den Komfort anbelangt wurden die beiden Varianten «EWS mit PVT» und «EWS mit PVT und PV» genau gleich beurteilt. Somit lagen die Unterschiede wieder bei der Ökologie und der Ökonomie. Die Varianten «Bivalent» und «LW WP mit PV» haben bei der

Fehleranfälligkeit am meisten Punkte eingebüsst. Es wurde davon ausgegangen, dass aufgrund der Komplexität der beiden Systeme mehr Störungen und Fehler auftreten könnten was den Komfort erheblich einschränkt. Die Fehleranfälligkeit der Variante «LW WP mit PV» stammt von der Kaskadensteuerung. Eine schlecht ausgeführte Kaskadensteuerung kann zu übermässigen Verschleiss von einem oder beiden Wärmeerzeugern und somit einem frühzeitigen Ausfall führen. Bei der Variante «Bivalent» besteht die Komplexität bei der Einbindung der Anlage in das hydraulische System sowie die Fehleranfälligkeit eines zusätzlichen Wärmeerzeugers. Dazu kommen die hohen Investitionskosten und die höhere Umweltbelastung, welche durch den höheren Strombedarf ausgelöst wurden.

Zum Schluss wurden noch das Szenario «Hinten rechts» ausgewertet. Auch dazu sind die Resultate in der nachfolgenden Abbildung 25 dargestellt.

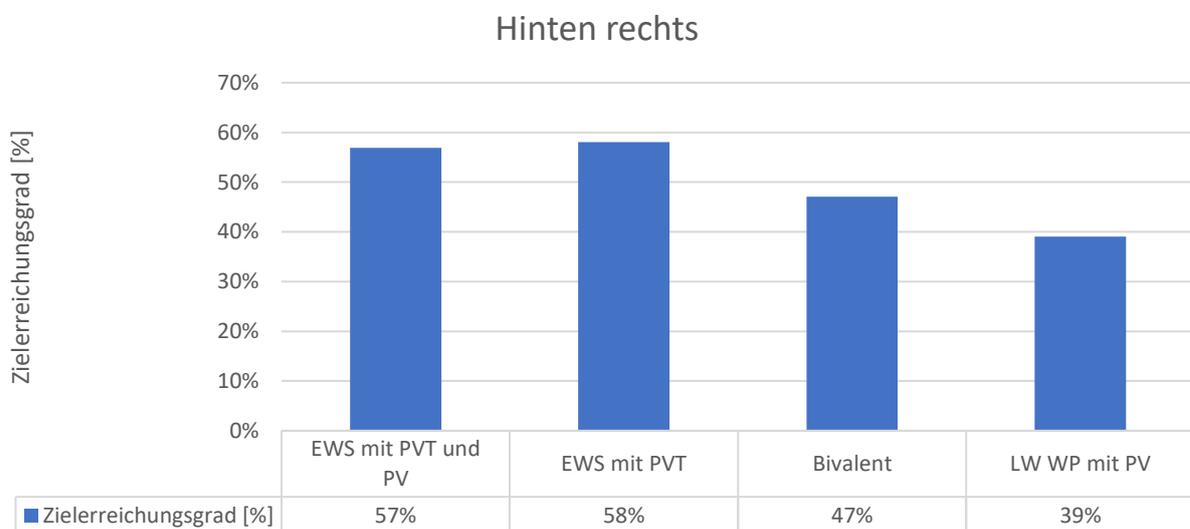


Abbildung 25: Vergleich der Zielerreichungsgrade im Szenario "Hinten rechts"

In diesem Szenario geht es hauptsächlich um die Wirtschaftlichkeit. Dabei erreicht keine der untersuchten Varianten einen Zielerreichungsgrad von mehr als 60 %. Aufgrund der geringeren Investitionskosten schneidet die Variante «EWS mit PVT» 1 %-Punkt besser ab als die Variante mit PV. Auf dem dritten Platz liegt die Variante «Bivalent» allerdings nur mit einem Zielerreichungsgrad von 47 %.

Alle Varianten mit Ausnahme von «EWS mit PVT» weisen sehr hohe Investitionskosten aus. Die grössten Unterschiede gab es deshalb bei den jährlichen Betriebs- und Unterhaltskosten sowie den spezifischen Wärmekosten. Hier konnten die Varianten welche die Erdwärme als Wärmequelle nutzen punkten. Sie weisen aufgrund des geringeren Strombedarfs die niedrigsten spezifischen Wärmekosten auf. Auch die Varianten «Bivalent» nutzt die Erdwärme als Wärmequelle. Der Strom, welcher für den Betrieb des Terra-Boosters eingesetzt wird, muss aber auch miteinbezogen werden. Aus diesem Grund ergeben sich höhere Energiekosten.

Die Variante mit der Luft-Wärmepumpe schneidet aufgrund der geringeren Jahresarbeitszahl schlechter ab.

Die in der Abbildung 26 gezeigte Gesamtübersicht zeigt die durchschnittlichen Zielerreichungsgrade der untersuchten Varianten.

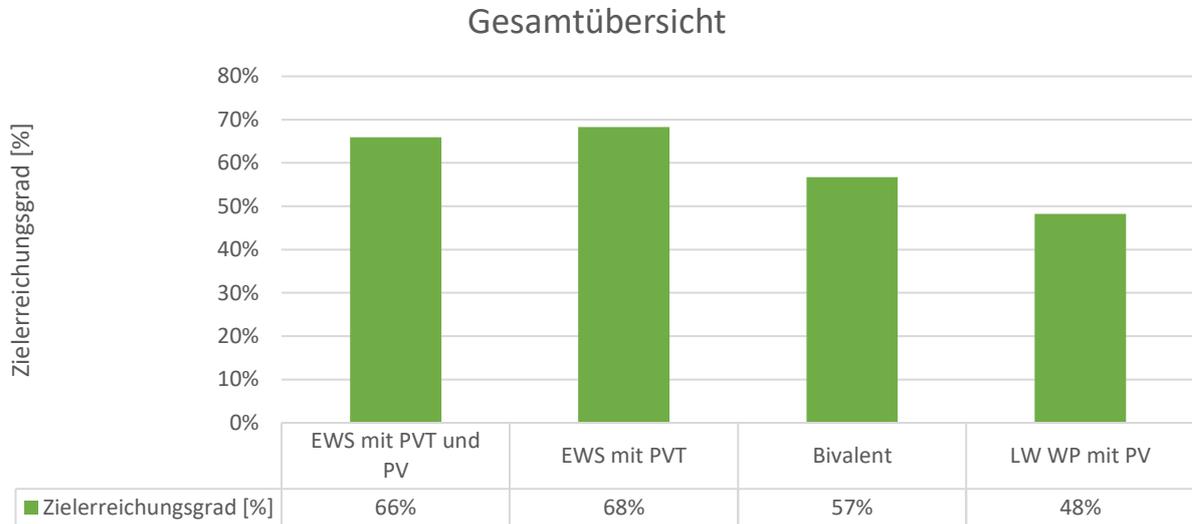


Abbildung 26: Vergleich der durchschnittlichen Zielerreichungsgrade der Varianten über alle drei Szenarien.

Es zeigt sich, dass aufgrund der Nutzwertanalyse die Variante «EWS mit PVT» durchschnittlich am besten bewertet wurde. Sie erreicht einen Zielerreichungsgrad von 68 %. Gefolgt von der Variante «EWS mit PVT und PV» diese erreicht einen Zielerreichungsgrad von 66 %. Auf dem dritten Platz liegt die Variante «Bivalent». Sie liegt mit 57 % Zielerreichungsgrad 9 %-Punkte vor der Variante «LW WP mit PV».

8 Empfehlungen Variantenentscheid

Basierend auf der Wirtschaftlichkeitsberechnung und der vorliegenden Nutzwertanalyse soll nun eine Empfehlung für die Eigentümerschaft erarbeitet werden. In dieser sollen die Resultate aus allen vorangehenden Arbeiten aufbereitet und zusammengefasst werden. Die Empfehlung wird aufgeteilt in verschiedene Bereiche. Es wird eine Empfehlung zur Wahl des geeigneten Wärmeerzeugers abgegeben. Es werden aber auch Empfehlungen zu einer allfälligen Etappierung der Umsetzung des Projektes abgegeben.

8.1 Resultate wirtschaftliche Betrachtung

Beim Entscheid für ein neues Heizsystem oder Energiekonzept sind meistens lediglich die Investitionskosten und die längerfristigen Einsparungen entscheidend. Die Investitionskosten für einen neuen Wärmeerzeuger sowie eine Solarstromanlage übersteigen in jedem Fall das Eingangs definierte Kostendach von 200'000 CHF. Es ist allerdings möglich die Realisierung des Projektes zu staffeln und eine Investition nach dem anderen zu tätigen. So können auch die Abzüge von den Steuern optimiert werden. Selbst wenn die Solarstromanlage weggelassen werden wird das Kostendach noch überschritten. Die günstigste Variante war die Luft-Wärmepumpe. Sie verursacht Nettoinvestitionen ohne Solarstromanlage in der Höhe von 194'000 CHF. Allerdings verursacht die Luft-Wärmepumpe auch die höchsten spezifischen Wärmekosten und folglich die höchsten Nebenkosten. Verglichen dazu sind die Varianten basierend auf der Erdwärmesonden, sei dies die Variante «EWS mit PVT» oder «Bivalent» sehr teuer. Die Varianten mit den Hybridkollektoren kosten rund 297'200 CHF. Die Variante «Bivalent» kostet 262'500 CHF. Sie übersteigen das Kostendach stark. Doch langfristig profitiert die Eigentümerschaft von bedeutend geringeren Nebenkosten. Die Kosten könnten weiter optimiert werden, indem der Umfang der PVT-Anlage weiter optimiert wird. Eine kleinere PVT-Anlage reduziert die Investitionskosten weiter. Wie bereits erwähnt profitiert die Eigentümerschaft bei den teureren Varianten von geringeren Wärmekosten. Dies führt zu den Einsparungen in den Nebenkosten wie Sie in der folgenden Tabelle 12 dargestellt wurden.

Tabelle 12: Vergleich der Spezifischen Wärmekosten und der Heizkosten

Variante	Durchschnittlicher Wärmeenergiebedarf	Spezifische Wärmekosten	Durchschnittliche Heizkosten	Durchschnittliche Einsparungen
Gasheizung bisher	7'195 kWh	30.6 Rp./kWh	2'200 CHF	-
EWS mit PVT	7'195 kWh	17.9 Rp./kWh	1'288 CHF	912 CHF (41.5 %)
EWS mit PVT mit PV	7'195 kWh	18.1 Rp./kWh	1'302 CHF	898 CHF (40.8 %)
LW-WP mit PV	7'195 kWh	22.5 Rp./kWh	1'619 CHF	581 CHF (26.4 %)
Bivalent	7'195 kWh	19.5 Rp./kWh	1'403 CHF	797 CHF (36.2 %)

Die Heizkosten für den Status Quo, also die Gasheizung basieren auf den Heizkosten der letzten drei Jahre. Die Wärmepreise für die neuen Heizsysteme basieren auf den Strompreisen für das Jahr 2023. Hier wurde bereits eine Preiserhöhung in der Höhe von rund 20 % miteingerechnet. Die Gaspreise für die Periode 2022 werden signifikant höher ausfallen wie im Kapitel 6.1 beschrieben. Somit werden die Einsparungen noch grösser ausfallen. Eine langfristige Prognose zu den Energiepreisen konnte allerdings nicht gemacht werden. Mit den Varianten «EWS mit PVT» und «EWS mit PVT und PV» lassen sich die Nebenkosten um mehr als 40 % reduzieren. Dies sind rund 900 CHF pro Jahr die gespart werden können. Aufgrund der wirtschaftlichen Aspekte kann die Luft-Wärmepumpe empfohlen werden. Sie weist die geringsten Investitionskosten auf und auch die spezifischen Wärmekosten sind noch bedeutend geringer als die Gasheizung. Längerfristig sind allerdings die Varianten basierend auf den Erdsonden-Wärmepumpen und den Hybridkollektoren die günstigste Option.

8.2 Resultate ökologische Betrachtung

Neben der Wirtschaftlichkeit der neuen Heizsysteme ist auch deren Umweltbelastung respektive die Ökologie relevant. Eine wichtige Kennzahl der Ökologie sind die CO₂-Emissionen. Durch die Bereitstellung von 129'504 kWh Nutzwärme mittels einer Gasheizung entstehen CO₂-Emissionen in der Höhe von rund 30'300 kg CO₂-Äquivalenten (KBOB, 2022). Durch die Elektrifizierung der Wärmeerzeugung entstehen keine direkten CO₂-Emissionen mehr. Dennoch ist jede Kilowattstunde Strom im schweizerischen Verbraucher Mix mit einer kleinen Menge CO₂-Emissionen belastet. So entstehen auch für die Wärmepumpen CO₂-Emissionen. Diese können reduziert werden indem für den Betrieb der Wärmepumpe ein Stromprodukt aus 100 % erneuerbarer Energie gewählt wird. Selbst der Solarstrom ist durch die Produktion der

Solarpanels und Elektronikkomponenten mit einer CO₂-Belastung versehen. Um zu vergleichen welchen Einfluss der Solarstrom auf die CO₂-Bilanz des Energiekonzepts hat wurde der Haushaltsstrom und der Solarstrom ebenfalls verglichen. Der Stromverbrauch setzt sich aus dem geschätzten Haushaltsstromverbrauch und dem Heizstromverbrauch zusammen. Das Referenzmodell weist einen geschätzten Stromverbrauch von rund 72'900 kWh auf. Wird dieser mit dem schweizerischen Verbrauchermix gedeckt so entstehen CO₂-Emissionen in der Höhe von 9'113 kg CO₂-Äquivalenten. Die CO₂-Emissionen und die dazugehörigen Einsparungen sind in der nachfolgenden Tabelle 13 ersichtlich.

Tabelle 13: CO₂-Emissionen der Energiekonzepte basierend auf den KBOB Kennzahlen

Variante	Jährliche CO ₂ -Emissionen Erdgas	Jährliche CO ₂ -Emissionen Strom	Gesamte jährliche CO ₂ -Emissionen	CO ₂ -Reduktion
Gasheizung bisher	30'304 kg CO ₂ -eq	9'113 kg CO ₂ -eq	39'417 kg CO ₂ -eq	-
EWS mit PVT	-	11'500 kg CO ₂ -eq	11'500 kg CO ₂ -eq	27'917 kg CO ₂ -eq (71 %)
EWS mit PVT mit PV	-	10'512 kg CO ₂ -eq	10'512 kg CO ₂ -eq	28'905 kg CO ₂ -eq (73 %)
LW-WP mit PV	-	11'736 kg CO ₂ -eq	11'736 kg CO ₂ -eq	27'680 kg CO ₂ -eq (70 %)
Bivalent	-	10'912 kg CO ₂ -eq	10'912 kg CO ₂ -eq	28'505 kg CO ₂ -eq (72 %)

Durch die Elektrifizierung der Heizung kann der jährliche CO₂-Ausstoss drastisch reduziert werden. Die oben gezeigten Daten zeigen ebenfalls auf, dass je grösser der Anteil an Solarstrom ist die CO₂-Emissionen der Wärmepumpe weiter abnehmen. Aus diesem Grund verursachen die Varianten «EWS mit PVT und PV» und «Bivalent» die geringsten CO₂-Emissionen. Sie verbrauchen aufgrund der hohen Effizienz die geringste Menge an Strom und können einen Grossteil davon mit der eigenen Produktion decken. Neben den CO₂-Emissionen sind auch die aufgewendete graue Energie sowie die Geruchs- und Lärmemissionen relevant. Je komplexer das System und je mehr Komponenten das Energiekonzept aufweist, desto mehr graue Energie musste für dessen Erstellung aufgewendet werden. Die graue Energie kann allerdings durch CO₂-Einsparungen «amortisiert» werden. Durch den Betrieb der Wärmepumpen entstehen keine Geruchsemissionen. Die Lärmemissionen sind nur bei aussenaufgestellten Anlagen ein Problem. Hier können die aussenaufgestellten Wärmepumpen zu Lärmstörungen führen.

Diese Lärmemissionen führen nicht nur zu Belastungen der ökologischen Umwelt, sondern auch der menschlichen Umwelt. Übermässige Lärmbelastungen können langfristige Folgen auf die Gesundheit der Menschen haben (BAFU, 2022). Besonders im städtischen Gebiet sollte deshalb auf zusätzliche Lärmverschmutzung verzichtet werden. Aufgrund der niedrigsten CO₂-Emissionen und der nicht vorhandenen Lärmbelastung werden die Varianten «EWS mit PVT» und «EWS mit PVT und PV» empfohlen.

8.3 Resultate Komfort und Benutzerfreundlichkeit

Auch der Komfort eines Heizsystems spielt eine wichtige Rolle bei der Entscheidung. Schlussendlich soll eine Heizung einfach funktionieren, ohne dass die Betreiber gross etwas damit zu tun haben. Dies kann bedeuten, dass keine manuellen Tätigkeiten wie früher das Einfeuern notwendig sind. Davon ist allerdings keine Variante betroffen. Vielmehr geht es bei diesem Aspekt um die Aufwände zur Fehlerbehebung. Bereits heute muss bei einem Heizungsdefekt eine Fachperson engagiert werden. Je komplexer das System, desto schwieriger wird es selbst für eine Fachperson den Fehler zu finden und zu beheben. Dies kann zu längeren Unterbrüchen und Mehrkosten führen.

Auch in dieser Kategorie der Nutzwertanalyse hat die Variante «EWS mit PVT» am besten abgeschlossen. Genau wie die Variante «EWS mit PVT und PV» ist sie am einfachsten in der Handhabung. Die Variante «EWS mit PVT und PV» hat aber durch die zusätzliche Photovoltaikanlage mehr Komponenten die kaputt gehen könnten. Was die Fehleranfälligkeit und die Komplexität des Systems erhöht. Dasselbe Problem haben die anderen beiden Varianten. Die Variante «Bivalent» mit Ihrem Terra-Booster hat einen weiteren Wärmeerzeuger der kaputt gehen kann und so zu Betriebsstörungen führen könnte. Das Kaskadensystem der Luft-Wärmepumpe ist genauso fehleranfällig und kann so erhebliche Komforteinbussen verursachen. Hinzu kommen die Lärmemissionen, die bei beiden Luft-Wärmetauschern entstehen. Diese können nicht nur den eigenen Komfort reduzieren, sondern auch den der Nachbarn. So kommt es vor, dass trotzdem alle Grenzwerte zur Lärmbelastung eingehalten werden aber die Nachbarn dennoch Lärmklage einreichen. Dies führt zu lästigen Auseinandersetzungen aber unter Umständen auch Mehrkosten für den Rück- oder Umbau des Heizsystems. Aus Komfortgründen sollten also Varianten, welche übermässig komplex sind und Lärmemissionen verursachen nicht weiterverfolgt werden.

8.4 Abschliessende Empfehlung

Basierend auf den in dieser Arbeit erarbeiteten Erkenntnissen wird die Variante der «EWS mit PVT» für einen Heizungsersatz empfohlen. Durch die Hybridkollektoren kann die Länge der benötigten Erdwärmesonden reduziert werden. Dies führt zu Reduktionen der Investitionskosten. Die Variante weist zwar bedeutend höhere Investitionskosten als das definierte Kostendach auf. Diese können durch eine optimierte Dimensionierung der Hybridkollektoren reduziert werden. Langfristig profitiert die Eigentümerschaft von bedeutend geringeren Nebenkosten. Es können rund 900 CHF pro Jahr und Haushalt eingespart werden. Ausserdem weist die Variante bedeutend geringere CO₂-Emissionen als die aktuelle Heizung auf. Gegenüber der aktuellen Heizung können die Emissionen um rund 71 % reduziert werden. Der Heizungsersatz kann in einem weiteren Verlauf durch eine Solarstromanlage ergänzt werden. Durch den Zubau einer Solarstromanlage können diese CO₂-Emissionen im Betrieb weiter reduziert werden. Die Solarstromanlage sorgt ausserdem für weitere Reduktionen in den Nebenkosten sofern der produzierte Solarstrom mittels eines Zusammenschluss zum Eigenverbrauch an die Eigentümer: Innen verkauft wird. Als Ergänzung zum Heizungsersatz und dem optionalen Zubau einer Solarstromanlage wird ein grossflächiger Ersatz der Elektroboiler in den einzelnen Liegenschaften empfohlen. Welche wirtschaftlichen Folgen dies für die einzelnen Eigentümer: innen hat wurde im separaten Energiesparblatt beschrieben. Auf dem Energiesparblatt wurde ausserdem der Ersatz der Umwälzpumpen beschrieben. Auch deren Ersatz wird grossflächig empfohlen. Bei beiden Energieeffizienzmassnahmen können eventuell Synergien genutzt werden, wenn einige Eigentümer: innen gemeinsam einen Ersatz anstreben oder wenn der Ersatz in die Arbeiten des Heizungsersatzes integriert wird.

9 Diskussion

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der Arbeit nochmals kurz zusammengefasst und interpretiert werden. Ausserdem sollen die Grenzen der Arbeit und Risiken aufgezeigt werden. Schlussendlich sollen die Ergebnisse auch noch mit Erfahrungen aus der Praxis verglichen werden.

9.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Arbeit nochmals zusammengefasst, um die wichtigsten Eckdaten für die Diskussion in Erinnerung zu rufen.

9.1.1 Norm-Heizlast und Dimensionierung

Die Norm-Heizlast der Gebäude wurde gemäss der SIA-Norm berechnet und beläuft sich auf 75 kW. Aufgrund dieses Leistungsbedarfs wurden die verschiedenen Varianten zur Wärmeerzeuge dimensioniert.

9.1.2 Energieeffizienzmassnahmen

In der Arbeit wurden bestimmte Energieeffizienzmassnahmen vorgeschlagen. Darunter den Ersatz von alten Umwälzpumpen oder den Ersatz von dezentralen Elektroboilern. Die Massnahmen wurden im Laufe der Arbeit aber nicht weiter in die Untersuchung der Varianten aufgenommen. Stattdessen wurde als Zusatzleistung für die Bachelorarbeit ein Energieeffizienzblatt für die Eigentümer: innen erstellt mit welchem Sie sich selbstständig den Energieeffizienzmassnahmen annehmen können. Schlussendlich handelte es sich bei den untersuchten Liegenschaften um Eigentümshäuser, für welche die Besitzer: innen selbst zuständig sind. Somit obliegt auch die energetische Sanierung den jeweiligen Eigentümer: innen.

9.1.3 Untersuchte Varianten

Im Laufe der Analyse wurden schrittweise mehr und mehr Wärmeerzeugungsvarianten ausgeschlossen bis am Ende nur noch 4 Varianten übrig waren. Die nachfolgenden vier Varianten wurden in Polysun genau modelliert und die Daten aus den Modellen für die Wirtschaftlichkeitsberechnung und die Nutzwertanalyse verwendet.

- Erdwärmesonden Wärmepumpe mit Hybridkollektoren und einer Photovoltaikanlage
«EWS mit PVT und PV»
- Erdwärmesonden Wärmepumpe mit Hybridkollektoren
«EWS mit PVT»
- Bivalentes System Erdwärmesonden Wärmepumpe und Luft-Wasser Wärmepumpe
«Bivalent»

- Reine Luft-Wasser Wärmepumpe mit einer Photovoltaikanlage
«LW WP mit PV»

Bei der Modellierung in Polysun wurde auf Eigenverbrauchsoptimierungen oder ähnliche Massnahmen verzichtet. Schlussendlich wird die Steuerung bei der Realisierung abhängig von den verschiedenen Herstellern sein. Die meisten Wärmepumpen oder auch Wechselrichter verfügen bereits über Zusatzmodule, welche den Eigenverbrauch automatisieren können und so einen Energieeffizienten Betrieb ermöglichen. Das Abbilden solcher Steuerungen hätte viel Aufwand bedeutet und hätte die Wirklichkeit keinesfalls richtig darstellen können. Die Varianten wurden also nicht optimiert, sodass alle Varianten gleich sind.

9.1.4 Polysun Kennzahlen

Mithilfe von Polysun wurden die verschiedenen Varianten simuliert, um daraus wichtige Kennzahlen für den Vergleich zu gewinnen. Besonders wichtig war dabei der gesamte Stromverbrauch des Systems, der Netzbezug, die Systemjahresarbeitszahl sowie der Brennstoff und Stromverbrauch der Wärmeerzeuger.

Es wurde festgestellt, dass die Varianten «EWS mit PVT und PV» und «EWS mit PVT» den geringsten Brennstoff und Strombedarf aufwiesen als die restlichen Varianten. Auch die Jahresarbeitszahl der beiden Varianten ist höher als die verbliebenen Varianten. Die Variante «Bivalent» liegt dabei allerdings nur wenig hinter den beiden effizientesten Varianten. Basierend auf den Polysun Simulationen haben die Varianten «EWS mit PVT und PV» und «EWS mit PVT» am besten abgeschnitten.

9.1.5 Wirtschaftliche Kennzahlen

Die Investitionskosten wurden mithilfe von Richtpreisofferten und Erfahrungen aus der Praxis so genau wie möglich abgeschätzt. Da es sich bei den vorliegenden Investitionskosten praktisch um einen Kostenvoranschlag handelt muss eine Unsicherheit von $\pm 25\%$ berücksichtigt werden. Zum Vergleich der Varianten, wurden sie der aktuellen Gasheizung gegenübergestellt. Die Kosten für die aktuelle Gasheizung basieren auf den Verbrauchsdaten der letzten 3 Jahre. Da die Heizperiode 2022 aber noch nicht eingeflossen ist, werden die durchschnittlichen Kosten für die Gasheizung noch gestiegen sein. Schliesslich hat sich allein im Jahr 2022 der Gaspreis um rund 50 % gesteigert. Der Amortisationsbeitrag stammt dabei lediglich von den Einsparungen aufgrund der effizienteren Heizung. Durch die Produktion von Wärme kann kein Gewinn erzielt werden. Einzig Varianten, welche eine eigene Stromproduktion vorsehen, können durch den Verkauf von Solarstrom an das Elektrizitätswerk echte monetäre Gewinne erzielen.

9.1.6 Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse wurde als weiteres System zum Vergleich der verschiedenen Varianten verwendet. Es wurde drei Szenarien ausgearbeitet welche die drei Aspekte:

- Ökonomie
- Ökologie
- Komfort

abbildete und die Varianten danach bewertete. Mithilfe dieser Analyse konnte aufgezeigt werden wie sich die verschiedenen Gewichtungen der Aspekte auf die Bewertung der Varianten auswirkte. Es zeigte sich, dass die Variante «EWS mit PVT» mit einem durchschnittlichen Zielerreichungsgrad von 68 % in allen Szenarien am besten abgeschlossen hat. Im Szenario «Enkelkindertauglich» konnte die Variante aufgrund der geringen CO₂-Emissionen und dem geringen Stromverbrauch im Betrieb Punkte sammeln. Im Szenario «Gäbigi Sach» wurde die Variante am besten bewertet, weil Sie durch die Einfachheit des Systems die geringste Fehleranfälligkeit aufwies. Die vergleichbare Variante mit der PV-Anlage wurde schlechter bewertet da die integrierte Photovoltaikanlage eine weitere Anlage darstellt, welche von Störungen oder Schäden betroffen sein könnte und somit zu mehr Aufwänden für die Reparatur und Unterhalt führen könnte. Selbst im Szenario «Hinten rechts» wurde die Variante am besten beurteilt. Dies aufgrund der geringen Investitionskosten sowie den niedrigsten Betriebs- und Unterhaltskosten. Die vermeintlich günstigste Variante der Luft-Wärmepumpe konnte hier nicht gut bewertet werden da die Investitionen aufgrund der Kaskadierung sehr hoch waren.

9.2 Interpretation der Ergebnisse

Zu Beginn der Arbeit wurde davon ausgegangen, dass eine Luft-Wärmepumpe die vermutlich günstigste Variante sein wird. Auch in der Praxis zeigt sich, dass Luft-Wärmepumpen aufgrund Ihrer einfachen Umsetzung und geringen Investitionskosten, die am meisten zugebaute erneuerbare Heizungen sind (Hefti & Marti, 2022).

Mittelgrosse Luft-Wärmepumpen werden eher selten realisiert da es oftmals an Standardgeräten mangelt. Genau dasselbe Problem bestand an der Houelbachstrasse, wo eine Heizlast von 75 kW realisiert werden musste. Die Kaskadenanlage mit der entsprechenden Steuerung ist teuer in der Anschaffung. Dies führt zu einen deutlich höheren spezifischen Wärmepreis als die anderen Varianten. Ausserdem sind solche Systeme oftmals fehleranfällig. Eine schlecht programmierte Kaskadensteuerung kann zu einem frühzeitigen und übermässigen Verschleiss eines Wärmeerzeugers führen. Aus diesen Gründen wurde die Luft-Wärmepumpe eher schlecht bewertet. Die bivalente Variante mit dem Terra-Booster wurde aufgrund der Komplexität und den durch die Luft-Wärmepumpe verursachten Lärm schlechter bewertet. Der Terra-Booster selbst ist nicht besonders teuer in der Anschaffung. Allerdings ist die hydraulische Einbindung einer solche Anlage eher schwierig. Sie bietet ausserdem eine zusätzliche Fehlerquelle, welche

wiederum zu einer schlechteren Bewertung geführt hat. Desweiteren geht einiges an Komfort verloren. Ein System mit Erdwärmesonden bietet bedeutend mehr Komfort. Schliesslich sind die Erdwärmesonden am Ende der Bauarbeiten nicht mehr sichtbar und die Wärmepumpe selbst ist verstaut im Heizungskeller. Es entstehen keine Lärmbelastungen und es stehen auch keine Fremdkörper wie Monoblock Wärmepumpen im Garten oder auf dem Vorplatz herum.

Mit dem Terra-Booster entfällt dieser Komfort. Er muss aussenaufgestellt werden und erzeugt eine Lärmemission im wie eine herkömmliche Luft-Wärmepumpe. Der Terra-Booster kann gerade in der Übergangszeit die Erdwärmesonden regenerieren. Somit würde der Betrieb des Terra-Boosters einzig der Regeneration des Untergrundes dienen und der Heizungsunterstützung. Durch die aktive Regeneration der Erdwärmesonden konnten knapp 10 % der benötigten Sondenmeter eingespart werden. Dies hatte einen signifikanten Einfluss auf die Investitionskosten. Dennoch, aus Sicht des Autors rechtfertigt dieser Nutzen die Mehrkosten sowie den Komfortverlust nicht. Dementsprechend fiel auch die Wertung in der Nutzwertanalyse aus. Schliesslich konnte derselbe Effekt mithilfe der Hybridkollektoren erzielt werden. Diese befinden sich auf dem Dach und stehen niemanden im Weg oder erzeugen Lärm. Mit einem durchschnittlichen Zielerreichungsgrad von 53 % konnte die Variante «Bivalent» nicht empfohlen werden.

9.3 Erfahrungen aus der Praxis

In diesem Kapitel sollen nun noch die praktischen Erfahrungen des Autors in die Diskussion einfließen. Als Energieberater und Projektleiter für erneuerbare Energiesysteme wird man oftmals mit ähnlichen Projekten konfrontiert.

Viele Kunden und Kundinnen haben dabei Ihre eigene Vorstellung davon, wie Sie Ihren Heizungsersatz durchführen wollen und welche Systeme Sie dabei anwenden wollen. Es ist dabei die Pflicht des Energieberaters die Kunden und Kundinnen dahingehend zu beraten, dass Sie das für sie am besten geeignete Heizungssystem auswählen und umsetzen. Es sind aber nicht nur die Wünsche und Bedürfnisse des Kunden oder der Kundin zu beachten. Im Hinterkopf einer jeden Beratung muss auch die Umsetzbarkeit des Projekts stehen.

Übermässig komplexe Heizungssysteme führen zu beachtenswertem Mehraufwand in der Projektplanung und in der Umsetzung des Bauprojektes. Aus diesem Grund sollten, wenn immer möglich möglichst einfache Systeme ausgewählt werden. Konzepte wie die Variante «Bivalent» versprechen einen optimalen und äusserst effizienten Betrieb. Doch die hydraulische Einbindung solcher Systeme ist oftmals schwierig und es erfordert äusserste Vorsicht beim Bau und der Inbetriebnahmen der Anlagen. Je komplexer eine Anlage, desto mehr Fehler können bei der Planung und bei der Ausführung geschehen. Dies führt zu unvorhergesehen Mehrkosten sei dies beim Bau oder beim Betrieb der Anlage, was schlussendlich auch zu einem weniger zufriedenstellenden Projekt führt.

Aus diesem Grund ist die Empfehlung für die Variante «EWS mit PVT» und einer optionalen Erweiterung durch eine Solarstromanlage in einer zweiten Phase des Projektes sicherlich die beste Option für die Eigentümerschaft an der Houelbachstrasse.

9.4 Unsicherheiten und Grenzen der Arbeit

Vorliegende Bachelorarbeit stellt eine gute Entscheidungsgrundlage dar welche der Eigentümerschaft bei der Wahl Ihres zukünftigen Heizsystems helfen soll. In der Arbeit wurden die gängigsten Lösungsvarianten untersucht. Sollte die Eigentümerschaft aber noch weitere Varianten wie die Realisierung eines Eisspeichers wünschen, welcher nur kurz besprochen wurde, so müsste sich die Eigentümerschaft bei den entsprechenden Herstellern eine Beratung einholen.

Ausserdem wurden für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit und der Investitionskosten keine Offerten eingeholt. Es handelt sich hauptsächlich um Richtpreise von einzelnen Lieferanten. Somit müssen alle Kennzahlen wie Investitionskosten mit einer Unsicherheit von $\pm 25\%$ angenommen werden. Das Einholen von konkreten Offerten sollte erst nach dem Variantenentscheid geschehen. Sollte sich eine Variante aufgrund von unvorhergesehenen Umständen massiv verteuern so müssten die Berechnungen innerhalb dieser Arbeit überholt und die Schlussfolgerungen kontrolliert werden. Dasselbe gilt, wenn eine Lösung bedeutend günstiger ausfällt.

Viele Kennzahlen welche als Grundlage für die Entscheidungsfindung dienten wurden mithilfe von Polysun Simulationen erarbeitet. In diesen Simulationen wurden die Gegebenheiten an der Houelbachstrasse so genau wie möglich dargestellt. Aber so wie alle Simulationen konnte sie die Wirklichkeit nicht zu 100 % abbilden. Aus diesem Grund müssen bei Kennzahlen wie dem Gesamtstromverbrauch oder dem Netzbezug wieder mit einer Unsicherheit von $\pm 25\%$ gerechnet werden.

10 Fazit

In der Bachelorarbeit konnte ein passendes Energiekonzept für die Überbauung an der Houelbachstrasse in Kriens erarbeitet werden. Dabei wurden vier verschiedene Varianten für einen Heizungsersatz mit integrierter Stromerzeugung miteinander verglichen. Eine der untersuchten Varianten wurde der Eigentümerschaft zur Realisierung empfohlen. Es wurde aufgezeigt, dass eine Elektrifizierung der Wärmeerzeugung den Endenergiebedarf drastisch reduziert. Dies führt zu deutlich geringeren Nebenkosten für die Wärmeerzeugung. Es wurden Varianten bestehend aus Luft-Wärmepumpen und Erdsonden-Wärmepumpen miteinander verglichen. Dabei zeigte sich, dass verglichen mit der aktuellen Gasheizung selbst die Luft-Wärmepumpe zu geringeren Heiznebenkosten führen würde. Obschon die Luft-Wärmepumpe eine deutlich geringere Jahresarbeitszahl und folglich einen höheren Stromverbrauch aufweist. Als schlussendliches Resultat wurde der Eigentümerschaft aber nicht die Luft-Wärmepumpe empfohlen. Sie mag die geringsten Investitionskosten aufweisen und noch immer deutlich effizienter sein als die aktuelle Gasheizung, doch durch den Einsatz einer Luft-Wärmepumpe entstehen andere Probleme. Die dazu benötigten Luft-Wärmepumpen wären sehr gross und müssten auf dem Grundstück der Houelbachstrasse platziert werden. Die Wärmepumpen verursachen im Betrieb gewisse Lärmemissionen welche für die Bewohner: innen oder die Nachbarn störend sein könnten. Zu oft kommt es vor, dass Luft-Wärmepumpen realisiert werden und bereits nach einer Heizperiode aufgrund von Lärmbeschwerden oder ähnlichem zurückgebaut oder angepasst werden müssen. Dies führt für die Eigentümerschaft zu grossen finanziellen Mehraufwänden und ruiniert die Stimmung in der betroffenen Nachbarschaft. Aus diesem Grund fällt es schwer die Variante zu empfehlen, wo es doch eindeutig noch bessere Varianten gibt. Diese Alternativen mögen in der Anschaffung teurer sein, doch längerfristig sind sie tatsächlich günstiger und die Eigentümerschaft spart sich so die unangenehmen Lärmklagen. So wurde schlussendlich die Variante der Erdsonden-Wärmepumpe mit Hybridkollektoren empfohlen. Mit dieser Variante verfügt die Eigentümerschaft über ein äusserst effizientes Heizsystem welches nicht nur sehr günstige Wärme bereitstellen kann, sondern auch noch einen kleinen Anteil Solarstromproduzieren kann. Ausserdem ist das System problemlos mit einer Solarstromanlage erweiterbar sodass nicht alle Investitionen im selben Jahr geschehen müssen. Die Staffelung sorgt ausserdem für weitere Steuereinsparungen für die Bauherrschaft. Hoffentlich wird sich die Eigentümerschaft für das vorgeschlagene Energiekonzept entscheiden. Die Elektrifizierung der Wärmeerzeugung trägt einen wichtigen Beitrag zum Energiewandel und der Erreichung der Klimaziele bei.

11 Literaturverzeichnis

- BAFU, B. für U. B. | O. fédéral de l'environnement O. | U. federale dell'ambiente. (2022). *Gesundheitliche Auswirkungen von Lärm*.
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-laerm/laerm--fachinformationen/auswirkungen-des-laerms/gesundheitliche-auswirkungen-von-laerm.html>
- Bürli Pellets AG. (2022). *Bürli Pellets AG*. <https://www.buerli-pellets.ch/de/holzpellets/bestellung-holzpellets>
- Consolar. (2022). PVT-Kollektor SOLINK. *Consolar Solare Energiesysteme GmbH*.
<https://www.consolar.de/de/pvt-kollektor-solink/>
- CONSOLAR. (2022). *Technische Dokumentation Solink*. https://www.consolar.de/wp-content/uploads/2021/02/TD_SOLINK_EN_2019_12_20_apomr.pdf
- Eidgenössische Elektrizitätskommission. (2022). *Gemeinde Kriens – Strompreise Schweiz*.
<https://www.strompreis.elcom.admin.ch/municipality/1059?period=2023&period=2022&period=2018&period=2017&view=expanded>
- Energie Wasser Luzern. (2022). *Ewl-Gaspreise 2023*.
- EnergieSchweiz, & Bundesamt für Energie BFE. (2021). *Faktenblatt-Typischer_Haushalt-DE.pdf*.
- Geoportal Kanton Luzern. (2022). *Karte Erdwärmenutzung Geoportal Luzern*.
https://svc.geo.lu.ch/main/rest/directories/printouts/Geoportal_1654247251986.pdf
- GRUNDFOS. (2017). *GRUNDFOS Alpha Datenheft.pdf*.
- Hefti, R., & Marti, B. (2022). *Einsatz von mittelgrossen Luft/Wasser-Wärmepumpen*.
- Hegele, D. (2021). *Thermal use of wood*. ZHAW.
- JaSolar. (2022). *Datenblatt JASolar_JAM60S20_370-395*.
https://www.solarmarkt.ch/herstimg/10-Solarmodule/JA_Solar/DB_EN_JASolar_JAM60S20_370-395_MR_KR_R30.pdf

- KBOB. (2022). *KBOB Datenbestand 2016 basierend auf ecoinvent Datenbestand Version 2.2/données 2016 de la KBOB fondées sur la base de données ecoinvent v2.2*; www.lc-inventories.ch.
- Luzern, rawi K. (2022, September 16). *Energiekennzahlen Wohngebäude*.
<https://www.geo.lu.ch/map/energie/>
- Meier, G., Liechti, S., & Timm, M. (2020). *Energiemanagementsysteme Digitales Werkzeug der Energieversorgung*. 105.
- meo ENERGY. (2022a). *Meo ActiveHEAT Produktblatt*. https://www.meo-energy.com/wp-content/uploads/meo_ActiveHEAT_2022V30.pdf
- meo ENERGY. (2022b). *Meo PROPILOT Produktblatt*. https://www.meo-energy.com/wp-content/uploads/meo_PROPILOT_2022V50.pdf
- Meteoswiss. (2022). *Meteodaten Luzern*.
- Mieter:innen- und Hauseigentümer:innen Verband Schweiz. (2019). *Paritätische Lebensdauertabelle: Bewertung von Einrichtungen*.
- Minder, S., Hefti, R., Ettl, N., & Weisskopf, T. (2016). *Eisspeicher-Wärmepumpen- Anlagen mit Sonnenkollektoren Wirtschaftlichkeit, Umweltbelastung und Marktpositionierung*.
https://www.velasolaris.com/wp-content/uploads/2018/12/be-eisspeicher_wirtsch_uwb_160222_v2.pdf
- Minder, S., Wagner, R., Mühlebach, M., & Weisskopf, T. (2014). *Technologiestudie Eisspeicher-Wärmepumpenanlagen mit Sonnenkollektoren*.
- Müller, B. (2022). *Houelbachstrasse*.
- Müller, B., Noessler, T., & Grammer Solar GMBH. (2022). *PVT-Kollektor erzeugt Strom und Wärme*. <http://www.bosy-online.de/Hybridkollektor.htm>
- Rohrer, J. (2022). *PVT-Versuchsanlage*. ZHAW Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen IUNR. <https://www.zhaw.ch/de/lsvm/institute-zentren/iunr/oekotechnologien-energiesysteme/erneuerbare-energien/solarenergie/pvt-versuchsanlage/>
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. (2005). *Heizungsanlagen in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast*. 50.

Schweizerischer Ingenieur- und & Architektenverein. (2013). *SIA 118 Allgemeine Bedingungen Bauarbeiten*.

Schweizerischer Ingenieur- und, & Architektenverein. (2021). *SIA 384/6 Erdwärmesonden*.

Treeze. (2022). *Transportrechner*. Umweltbelastungen für Transportmittel.

https://treeze.ch/fileadmin/user_upload/calculators/KBOB_Rechner/transport.html

Ubakus, O. U.-W. R. (2022a). *BA_Houelbachstrasse_Dach.pdf*.

Ubakus, O. U.-W. R. (2022b). *BA_Houelbachstrasse_Fassade.pdf*.

Zogg, Kobler, R., Haller, M., & Hubacher, P. (2021). *Wärmepumpen und PV - Planungsgrundlagen für Wohnbauten (EFH und MFH)*.

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Simulationsresultate des Referenzmodells mit einer 75 kW Gasheizung	38
Tabelle 2: Simulationsresultate der Variante bestehend aus einer reinen Luft-Wasser Wärmepumpe inkl. Photovoltaikanlage	40
Tabelle 3: Simulationsresultate der Variante bestehend aus 7 Erdwärmesonden einer Wärmepumpe und 1 Hybridkollektorfeld	42
Tabelle 4: Simulationsresultate der Variante bestehend aus 7 Erdwärmesonden einer Wärmepumpe und 1 Hybridkollektorfeld	44
Tabelle 5: Simulationsresultate der Variante "Bivalent" bestehend aus Erdwärmesonden und einem Luft-Wärmetauscher	46
Tabelle 6: Wirtschaftliche Kennzahlen der Variante Luft-Wärmepumpe mit PV-Anlage	56
Tabelle 7: Wirtschaftliche Kennzahlen der Variante EWS mit PVT	60
Tabelle 8: Wirtschaftliche Kennzahlen der Variante Bivalent	61
Tabelle 9: Wirtschaftliche Kennzahlen der 75 kWp Solarstromanlage für die Varianten "Luft-Wärmepumpe" und "Bivalent"	62
Tabelle 10: Wirtschaftliche Kennzahlen der 50 kWp Solarstromanlage für die Varianten mit Erdsonden-Wärmepumpen und PVT-Kollektoren	63
Tabelle 11: Gewichtung der drei Aspekte in den verschiedenen Szenarien	66
Tabelle 12: Vergleich der Spezifischen Wärmekosten und der Heizkosten	71
Tabelle 13: CO ₂ -Emissionen der Energiekonzepte basierend auf den KBOB Kennzahlen	72

13 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Untersuchungsperimeter an der Houelbachstrasse in 6010 Kriens mit den eingezeichneten Parzellen	10
Abbildung 2: Einblick in den Heizungsraum inkl. den privaten Gegenständen	11
Abbildung 3: Auszug aus dem kantonalen Geoportal zur Erdwärmennutzung (Geoportal Kanton Luzern, 2022)	20
Abbildung 4: Lokalisierung der Erdwärmesonden (rot) auf dem Siedlungsgrundstück (Geoportal Kanton Luzern, 2022)	21
Abbildung 5: Hydraulisches Schema des «SOLINK»-Systems des Herstellers «Consolar» (Müller et al., 2022).	25
Abbildung 6: Ansicht auf die Ostseite eines Daches an der Houelbachstrasse	26
Abbildung 7: Bereits bestehende PV-Anlage (Müller, 2022)	28
Abbildung 8: Polysun Modell der Referenzvariante mit einem Gaskessel ohne Pufferspeicher	37
Abbildung 9: Polysun Modell mit einer Luft-Wasser Wärmepumpe und reiner PV-Anlage	39
Abbildung 10: Polysun Modell mit Erdwärmesonden und PVT-Kollektoren und einer PV-Anlage	41
Abbildung 11: Polysun Modell mit Erdwärmesonden und PVT-Kollektoren	43
Abbildung 12: Polysun Modell mit einer Wärmepumpe, Luft-Wasser Wärmetauscher und Erdwärmesonden	45
Abbildung 13: Brennstoff- und Stromverbrauch der Wärmeerzeuger der untersuchten Varianten	47
Abbildung 14: Netzbezug der untersuchten Varianten	48
Abbildung 15: Nettoinvestitionen für die Variante Luft-Wärmepumpe mit PV-Anlage	54
Abbildung 16: Jährliche Kosten der Variante Luft-Wärmepumpe mit PV-Anlage	55
Abbildung 17: Nettoinvestitionskosten der Variante EWS mit PVT und PV	57
Abbildung 18: Jährliche Kosten der Variante EWS mit PVT und PV	57
Abbildung 19: Nettoinvestitionskosten der Variante EWS mit PVT	58
Abbildung 20: Jährliche Kosten der Variante EWS mit PVT	59
Abbildung 21: Nettoinvestitionskosten für die Variante "Bivalent"	60
Abbildung 22: Jährliche Kosten für die Variante "Bivalent"	61
Abbildung 23: Vergleich der Zielerreichungsgrade im Szenario "Enkelkindertauglich"	67
Abbildung 24: Vergleich der Zielerreichungsgrade im Szenario "Gäbigi Sach"	67
Abbildung 25: Vergleich der Zielerreichungsgrade im Szenario "Hinten rechts"	68
Abbildung 26: Vergleich der durchschnittlichen Zielerreichungsgrade der Varianten über alle drei Szenarien.	69