



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# Bachelorthesis

Hannes Kübler

LowEx-Nahwärme

Simulation und Bewertung von Varianten der  
Heizwärme- und Trinkwarmwasserversorgung im  
Bestandsgebäude

Fakultät Technik und Informatik  
Department Informations- und  
Elektrotechnik

Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Information and  
Electrical Engineering

Hannes Kübler

LowEx-Nahwärme

Simulation und Bewertung von Varianten  
der Heizwärme- und Trinkwarmwasserversorgung im  
Bestandsgebäude

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung  
im Studiengang Regenerative Energiesysteme und Energiemanagement  
am Department Informations- und Elektrotechnik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Holger Gräßner  
Zweitgutachter und Betreuer im Unternehmen: Dr. Ing. Manuel Gottschick

Abgegeben am 31. August 2018

**Hannes Kübler**

**Thema der Bachelorthesis**

LowEx-Nahwärme - Simulation und Bewertung von Varianten der Heizwärme- und Trinkwarmwasserversorgung im Bestandsgebäude

**Stichworte**

Niedertemperatur Heizkomponenten, Wärmeerzeugung, Wärmepumpe, Polysun

**Kurzzusammenfassung**

In dieser Arbeit werden Möglichkeiten aufgezeigt ein mehrstöckiges Bestandsgebäude mit einem Niedertemperatur Nahwärmenetz zu versorgen. Durch die Untersuchung des Bestandsgebäudes können Aussagen zu dem Wasserverbrauch, dem Wärmeverbrauch und der möglichen Umrüstung der Heizungsanlage getroffen werden. Diverse Temperaturen und Technologien werden zu Grunde gelegt, um mithilfe einiger Modelle ausgewählte Experimente zu simulieren. Die unterschiedlichen Experimente können so unter ökonomischen sowie ökologischen Gesichtspunkten verglichen werden. In der Bewertung wird gesondert auf die Verträglichkeit und das Empfinden des menschlichen Körpers eingegangen. Ein Ausblick auf die möglichen Eigenschaften des Nahwärmenetzes und die Möglichkeit zur Wärmespeicherung runden die Arbeit ab.

**Hannes Kübler**

**Title of the paper**

LowEx local heat network – simulation and evaluation of variants of heat supply for heating and hot drinking water in an existing building

**Keywords**

Low temperature heating components, Heat generation, heat pump, Polysun

**Abstract**

The case of this thesis is to evaluate different possibilities for connecting a low heat network to an existing multi-story building. The building will be analysed in order to gain insight into water consumption, heat demand and the efficiency of variants of the heat system. Diverse temperatures and technologies will be used to create several models and to simulate the performance. After the simulation the models will be compared with each other, with environmental and economic performance in mind. The evaluation also will evaluate the comfort level with respect to the human body. The thesis is completed by an outlook for the practicable characteristics of the low heat network and the possibility of integrating a heat reservoir.

## **Danksagung**

Mein Dank gilt zunächst meinem Betreuer, Prof. Dr.-Ing. Holger Gräßner, sowie Dr. Ing. Manuel Gottschick der betreuenden Firma Our Common Future Consulting (OCFC) für Ihre Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit.

Bei Herrn Dr. Gottschick möchte ich mich besonders für die zur Verfügung gestellte Zeit und die zahlreichen Anregungen während der drei Monate bedanken. Herrn Prof. Gräßner danke ich für die entgegengebrachten Denkanstöße und die stets bereitwillige Klärung bei Fragen.

Weiterhin möchte ich mich bei Frau Knoop der Firma OCFC für die Bereitstellung der Daten und die Kontaktherstellung zu dem Ansprechpartner der Gemüsefrosterei bedanken.

Besonderer Dank gilt meiner Familie und Freunden, die mich im Studium unterstützt haben.

# Inhaltsverzeichnis

|  |     |
|--|-----|
| Abbildungsverzeichnis.....   | III |
| Tabellenverzeichnis.....   | V   |
| Abkürzungs- und Symbolverzeichnis .....                                    | VI  |
| Glossar .....  | IX  |
| 1 Einleitung und Aufgabenstellung .....                                    | 1   |
| 2 Einführung in die Wärmeerzeugung .....                                   | 2   |
| 2.1 Konventionelle Wärmeerzeugung .....                                    | 2   |
| 2.1.1 Heizkessel – Eigenschaften und Bauarten .....                        | 2   |
| 2.1.2 Blockheizkraftwerke und die Eigenschaften .....                      | 3   |
| 2.2 Regenerative Wärmeerzeugung .....                                      | 3   |
| 2.2.1 Geothermie – Eigenschaften und Nutzungsmöglichkeiten .....           | 4   |
| 2.2.2 Aerodynamische Energiegewinnung .....                                | 7   |
| 3 Heizkörper und Blick auf das menschliche Wohlbefinden.....               | 8   |
| 3.1 Eigenschaften von Heizkörpern .....                                    | 8   |
| 3.1.1 Wärmeverteilung über Wärmeleitung .....                              | 8   |
| 3.1.2 Wärmeverteilung über Wärmestrahlung .....                            | 8   |
| 3.2 Empfindung des menschlichen Körpers .....                              | 9   |
| 4 Bestandsaufnahme und Untersuchung der Gegebenheiten .....                | 10  |
| 4.1 Eigenschaften der Mitarbeiterunterkunft.....                           | 10  |
| 4.2 Ermittlung des Warmwasserverbrauchs.....                               | 12  |
| 4.3 Ermittlung des Wärmeverbrauchs .....                                   | 17  |
| 4.3.1 Berechnung des Heizwärmebedarfs auf Grundlage der WSVO95 .....       | 18  |
| 4.3.2 Berechnung des Heizwärmebedarfs auf Grundlage des Ölverbrauchs ..... | 20  |
| 4.4 Eigenschaften des Nahwärmenetzes .....                                 | 21  |
| 4.5 Prinzipieller Aufbau des Abwärme-Kreisprozesses.....                   | 27  |
| 5 Energieeffizienzmaßnahmen und Umrüstungsmöglichkeiten .....              | 32  |
| 5.1 Mögliche Dämmmaßnahmen .....   | 32  |
| 5.2 Richtige Wahl der Heizungselemente .....                               | 34  |
| 5.3 Wahl einer Anlage zur Temperaturerhöhung .....                         | 35  |
| 6 Simulation und Bewertung .....   | 36  |
| 6.1 Vorstellung der Software Polysun .....                                 | 36  |
| 6.2 Modellwahl .....   | 40  |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 6.2.1 | Direkte Nutzung der Nahwärme.....                                       | 41 |
| 6.2.2 | Luft-Wasser-Wärmepumpe.....   | 43 |
| 6.3   | Simulation der Modelle.....   | 45 |
| 6.3.1 | Direkte Nahwärmenutzung .....   | 45 |
| 6.3.2 | Nutzung einer zusätzlichen Luft-Wasser-Wärmepumpe.....                  | 48 |
| 6.4   | Vergleich und Bewertung der Experimente .....                           | 52 |
| 6.4.1 | Energetischer Vergleich aller zwölf Varianten .....                     | 52 |
| 6.4.2 | Wirtschaftlichkeitsberechnung .....                                     | 58 |
| 6.4.3 | Wirtschaftlichkeitsberechnung für die Variante L-W 5 .....              | 60 |
| 6.4.4 | Wirtschaftlichkeitsberechnung für die Variante L-W 7 .....              | 61 |
| 6.4.5 | Wirtschaftlichkeitsberechnung für die Variante L-W 9 .....              | 61 |
| 6.4.6 | Wirtschaftlichkeitsberechnung für die Variante Direkt 3.....            | 62 |
| 6.4.7 | Vergleich der Wirtschaftlichkeitsberechnungen .....                     | 62 |
| 7     | Praktischer Ausblick.....   | 63 |
| 7.1   | Möglichkeiten der Wärmespeicherung .....                                | 63 |
| 7.1.1 | Sensible Wärmespeichersysteme.....                                      | 64 |
| 7.1.2 | Latentwärmespeichersysteme .....  | 64 |
| 7.1.3 | Thermochemische Speichersysteme.....                                    | 64 |
| 7.1.4 | Vergleich und Wahl eines passenden Speichersystems .....                | 65 |
| 7.2   | Zusätzliche Wärmeerzeugung.....   | 66 |
| 7.2.1 | Elektrisches Heizelement .....  | 66 |
| 7.2.2 | Blockheizkraftwerk als zusätzlicher Wärmeerzeuger.....                  | 66 |
| 7.2.3 | Brennwertkessel als zusätzlicher Wärmeerzeuger .....                    | 67 |
| 7.3   | Vergleich der Kosten für Wärmespeicher und zusätzlichem -erzeuger ..... | 68 |
| 8     | Fazit und Zukunftsaussichten .....                                      | 69 |
| 9     | Literaturverzeichnis.....   | 71 |
|       | Anhang.....   | 74 |

## Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 2.1: Förder- und Schluckbrunnen mit Wasser-Wasser-Wärmepumpe [1] .....        | 4  |
| Abbildung 2.2: Erdkollektor mit Sole-Wasser-Wärmepumpe [1] .....                        | 5  |
| Abbildung 2.3: Erdsonde mit Sole-Wasser-Wärmepumpe [1].....                             | 6  |
| Abbildung 2.4: Luft-Wasser-Wärmepumpenanlage [1].....                                   | 7  |
| Abbildung 4.5: Ermittlung des Ölverbrauchs mit linearer Regression [12] .....           | 11 |
| Abbildung 4.6: Ansicht der Mitarbeiter-Unterkunft .....                                 | 12 |
| Abbildung 4.7: Wasserverwendung pro Einwohner am Tag [13] .....                         | 13 |
| Abbildung 4.8: Spezifischer Warmwasserverbrauch der Mitarbeiter Unterkunft .....        | 14 |
| Abbildung 4.9: Skizze der Wärmegewinne und -verluste eines Gebäudes.....                | 17 |
| Abbildung 4.10: Schematische Wärme-Energiewandlungskette des Bestandsgebäudes.....      | 20 |
| Abbildung 4.11: Skizze möglicher Kälteanlagenstandorte und Lage des Nahwärmenetzes .    | 21 |
| Abbildung 4.12: Typ. Heizkurven und Wahl einer Kennlinie - hohes Temperaturniveau [3].. | 23 |
| Abbildung 4.13: Gemittelte Außentemperaturen von Wöhrden (Daten aus Polysun [19]).....  | 23 |
| Abbildung 4.14: Mathematisch angenäherte Heizkurve - hohes Temperaturniveau .....       | 24 |
| Abbildung 4.15: Wahl einer Heizkennlinie - mittleres Temperaturniveau [3] .....         | 25 |
| Abbildung 4.16: Mathematisch angenäherte Heizkurve - mittleres Temperaturniveau .....   | 25 |
| Abbildung 4.17: Nahwärmtemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur .....             | 26 |
| Abbildung 4.18: Skizze des prinzipiellen Abwärme-Kreisprozesses .....                   | 27 |
| Abbildung 4.19: Ermittlung des Rohrendurchmessers mithilfe des Volumenstroms [21]..     | 28 |
| Abbildung 4.20: Wirtschaftliche Dämmdicke in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers [21] ... | 29 |
| Abbildung 5.21: Ungedämmtes Dach der Unterkunft .....                                   | 33 |
| Abbildung 6.22: Funktionsflächen von Polysun [19] .....                                 | 36 |
| Abbildung 6.23: Eigenschaften einer Fußbodenheizung aus Polysun [19] .....              | 38 |
| Abbildung 6.24: Ausschnitt der Heiz- und Kühlelement-Liste von Polysun [19] .....       | 38 |
| Abbildung 6.25: Steuerungsauswahl von Polysun [19].....                                 | 39 |
| Abbildung 6.26: Modell der Nahwärme Direktnutzung.....                                  | 41 |
| Abbildung 6.27: Modell der Nahwärmenutzung mit Luft-Wasser-Wärmepumpe.....              | 43 |
| Abbildung 6.28: Modell der Nahwärmenutzung mit L-W, Radiator und Fußbodenheizung ...    | 44 |
| Abbildung 6.29: Temperaturabhängigkeiten bei direkter Nahwärmenutzung.....              | 45 |
| Abbildung 6.30: Direkte Nahwärmenutzung Vergleich des Gesamtstromverbrauchs .....       | 46 |
| Abbildung 6.31: Stromverbrauch von Direkt 1 im Detail .....                             | 47 |
| Abbildung 6.32: Temperaturabhängigkeiten L-W und Fußbodenheizung .....                  | 48 |
| Abbildung 6.33: Temperaturabhängigkeiten L-W und Radiator .....                         | 48 |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 6.34: Gesamtstromverbrauch aller Varianten mit Nutzung einer L-W .....           | 49 |
| Abbildung 6.35: Stromverbrauch von L-W 1 im Detail .....                                   | 50 |
| Abbildung 6.36: Übers Jahr gemittelte Wärmepumpen Anlagenaufwandszahl .....                | 51 |
| Abbildung 6.37: Vergleich der gemittelten Gebäudeluftfeuchtigkeit pro Jahr aller Varianten | 52 |
| Abbildung 6.38: Vergleich der Gebäudetemperatur aller Varianten .....                      | 52 |
| Abbildung 6.39: Vergleich vom Stromverbrauch des elektrischen Heizelements .....           | 53 |
| Abbildung 6.40: Warmwasser- und oberste Schichttemperatur des Warmwasserspeichers.         | 54 |
| Abbildung 6.41: Vergleich des Stromverbrauchs pro Jahr ohne zusätzliche Wärmepumpe .       | 55 |
| Abbildung 6.42: Gesamtstromverbrauch aller Varianten pro Jahr mit L-W .....                | 56 |
| Abbildung 7.43: Investitionskosten pro m <sup>3</sup> Warmwasserspeicher .....             | 65 |



## Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 4.1: Ermittlung des Heizwärmebedarfs [18].....                                | 18 |
| Tabelle 4.2: Abwärmequellen der Frosterei [11].....                                   | 22 |
| Tabelle 5.3: Auswirkungen von unterschiedlichen Dämmmaßnahmen [17].....               | 32 |
| Tabelle 5.4: Heizkörper für die mögliche Umrüstung aus Polysun [19].....              | 34 |
| Tabelle 6.5: Komponenten in Polysun [19].....   | 37 |
| Tabelle 6.6: Varianten der direkten Nahwärme-Nutzung.....                             | 42 |
| Tabelle 6.7: Varianten der Nahwärme-Nutzung mithilfe einer Luft-Wasser-Wärmepumpe ... | 44 |
| Tabelle 6.8: Benötigte Begriffe für die Berechnung des Kapitalwerts .....             | 58 |
| Tabelle 6.9: Ergebnisse von den Wirtschaftlichkeitsberechnungen.....                  | 62 |

## Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

|            |  |    |
|------------|--|----|
| $A_i$      | : Außenfläche eines Bauteils                               | 18 |
| $A_{Hi}$   | : Fläche eines Heizelements                                | 59 |
| $c_{p,W}$  | : Wärmekapazität von Wasser                                | 16 |
| $c_{p,L}$  | : Wärmekapazität von Luft                                  | 19 |
| $d_a$      | : Innendurchmesser der Dämmung                             | 15 |
| $d_{a,D}$  | : Außendurchmesser der Dämmung                             | 15 |
| $d_{i,D}$  | : Außendurchmesser des Mediumrohrs                         | 29 |
| $d_{a,ER}$ | : Außendurchmesser des ungestörten Erdreiches              | 29 |
| $d_{a,M}$  | : Außendurchmesser des Kunststoffmantels                   | 29 |
| $G_T$      | : Gradtagszahl   | 18 |
| $H_i$      | : Heizelementanzahl  | 59 |
| $I_0$      | : Anfangsinvestition                                       | 58 |
| $K$        | : Kapitalwert  | 58 |
| $K_F$      | : Kosten für Fußbodenheizung mit Einbau                    | 59 |
| $K_G$      | : Kosten mit großem Warmwasserspeicher                     | 59 |
| $K_K$      | : Kosten mit kleinem Warmwasserspeicher                    | 59 |
| $K_R$      | : Kosten für Niedertemperaturradiator mit Einbau           | 59 |
| $K_{Öl}$   | : Kosten für das verbrauchte Öl                            | 45 |
| $l_R$      | : Rohrlänge  | 14 |
| $\dot{m}$  | : Massenstrom  | 30 |
| $P_{EW}$   | : Leistung der erzeugerseitigen Wärmepumpe                 | 56 |
| $q$        | : Abzinsungsfaktor   | 58 |
| $Q_{AB}$   | : Während der Betriebspause benötigte Energie der Siedlung | 67 |
| $Q_{EG}$   | : Endenergie gesamt  | 19 |
| $Q_{EW}$   | : Stromverbrauch der erzeugerseitigen Wärmepumpe           | 56 |
| $Q_{EÖL}$  | : Endenergie mit Ölverbrauchsermittlung                    | 20 |
| $Q_{EbÖL}$ | : Spezifischer Endenergiebedarf mit Ölverbrauchsermittlung | 21 |
| $Q_{GW}$   | : Gesamtheizwärmebedarf                                    | 18 |
| $Q_H$      | : Heizwärme  | 18 |
| $Q_I$      | : Interne Wärmegewinne                                     | 17 |

|                    |   |    |
|--------------------|---|----|
| $Q_L$              | : Lüftungswärmeverluste                                       | 17 |
| $Q_M$              | : Abwärmeleistung Verdichter-Motor                            | 27 |
| $Q_N$              | : Nahwärme-Leitungsverluste                                   | 29 |
| $Q_{PE}$           | : Primärenergiebedarf gesamt                                  | 19 |
| $Q_R$              | : nicht verbrauchte Leistung zurück bei der Frosterei         | 23 |
| $Q_{RG}$           | : Leistung nach den Gebäuden vor der Nahwärmeleitung          | 23 |
| $Q_S$              | : Nahwärmeleistung bei der Siedlung                           | 30 |
| $Q_T$              | : Transmissionswärmeverluste                                  | 17 |
| $Q_{Talt}$         | : Heizwärmebedarf ohne Dämmung                                | 32 |
| $Q_{Tneu}$         | : Heizwärmebedarf mit Dämmung                                 | 32 |
| $Q_V$              | : Abwärmeleistung des Verflüssigers                           | 27 |
| $\dot{q}_{V,Rohr}$ | : Wärmeverlust eines Rohres pro Meter                         | 29 |
| $Q_{HW}$           | : Heizleistung der erzeugerseitigen Wärmepumpe                | 55 |
| $q_W$              | : Spezifische Wärmeabgabe pro Meter Leitung                   | 15 |
| $Q_{WW}$           | : Energie zur Warmwassererhitzung pro Jahr                    | 16 |
| $Q_{WWGesamt}$     | : Energie zur Warmwassererhitzung pro Jahr inklusive Verluste | 16 |
| $Q_{ZVGesamt}$     | : Gesamter Zirkulationsverlust                                | 15 |
| $Q_{ÖL}$           | : Mögliche Wärmeerzeugung durch ÖL                            | 20 |
| $t$                | : Betrachtungszeitraum  | 55 |
| $t_1$              | : Niedriges Temperaturniveau                                  | 11 |
| $t_2$              | : Hohes Temperaturniveau                                      | 11 |
| $t_3$              | : Rücklauftemperatur der Nahwärme am Gebäude                  | 27 |
| $t_4$              | : Rücklauftemperatur der Nahwärme an der Frosterei            | 27 |
| $t_{Erde}$         | : Erdtemperatur   | 16 |
| $t_{Raum}$         | : Temperatur im Raum  | 14 |
| $t_V$              | : Vorlauftemperatur   | 14 |
| $t_R$              | : Rücklauftemperatur  | 20 |
| $U$                | : Wärmedurchgangskoeffizient                                  | 18 |
| $U_i$              | : Wärmedurchgangskoeffizient des jeweiligen Bauteils          | 18 |
| $U_{i\_alt}$       | : Wärmedurchgangskoeffizient ohne Dämmung                     | 32 |
| $U_{i\_neu}$       | : Wärmedurchgangskoeffizient mit Dämmung                      | 32 |
| $U_R$              | : Wärmedurchgangskoeffizient des gedämmten Rohrs              | 15 |

|                |  |    |
|----------------|--|----|
| $\dot{V}$      | : Volumenstrom der Nahwärmeleitung                     | 27 |
| $V_b$          | : Brutto-Volumen                                       | 19 |
| $V_{Erdgas}$   | : Erdgas Verbrauch in m <sup>3</sup>                   | 67 |
| $V_L$          | : Belüftetes Netto-Volumen                             | 19 |
| $V_{Speicher}$ | : Speichervolumen des Warmwasserspeichers              | 65 |
| $z$            | : Kalkulatorischer Zinssatz                            | 58 |
| $Z$            | : Kosteneinsparung                                     | 58 |
| $Z_V$          | : Zirkulationsverluste                                 | 16 |
| $\alpha_a$     | : Äußerer Wärmeübergangskoeffizient                    | 15 |
| $\beta$        | : Luftwechselzahl                                      | 19 |
| $\Delta t$     | : Differenz zwischen hohem und tiefem Temperaturniveau | 15 |
| $\Delta Q$     | : Transmissionswärmeeinsparungen                       | 32 |
| $\eta_K$       | : Wirkungsgrad des Konstant-Öl-Temperatur-Kessels      | 2  |
| $\eta_{BK}$    | : Wirkungsgrad des Brennwert-Kessels                   | 67 |
| $\lambda_D$    | : Wärmeleitfähigkeit der Dämmung                       | 15 |
| $\lambda_{ER}$ | : Wärmeleitfähigkeit des Erdreiches                    | 29 |
| $\lambda_M$    | : Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffmantels             | 29 |
| $\rho_L$       | : Dichte von Luft                                      | 19 |
| $\rho_W$       | : Dichte von Wasser                                    | 27 |

## Glossar

- Anlagenaufwandszahl** Die Anlagenaufwandszahl beschreibt das Verhältnis zwischen Primärenergie und Nutzenergie. Somit ist diese ein Indiz für die Effizienz wie auch den Wirkungsgrad einer Wärmepumpe [1].
- Enthitzung** Durch die Enthitzung wird einem Kältemittel die Heißgaswärme bis zum Beginn der Kondensation entzogen. Dadurch können Temperaturen leicht unter der Verflüssigungstemperatur erreicht und die Kälteleistung erhöht werden [2].
- Exergie** Exergie wird auch als höherwertige, arbeitsfähige Energie bezeichnet [3]. Der nutzbare Teil einer Energie wird als Exergie bezeichnet [4]. Exergie lässt sich uneingeschränkt in andere Energieformen umwandeln [5].
- Fernwärme** Verteilung thermischer Energie in Form von Dampf, Wasser oder anderen Flüssigkeiten von einem oder mehreren vergleichsweise großen Erzeugern mithilfe eines Rohrnetzes an Gebäude oder Anlagen zur Nutzung in Form von Raum- oder Prozesswärme/-kälte [6] [7].
- Förderbrunnen** Über den Förderbrunnen wird ein Teil des Grundwassers zur Wärmepumpe gepumpt [1].
- Kraft-Wärme-Kopplung** Die Abwärme, die bei stromproduzierenden Kraftwerken anfällt und die normalerweise in einem Kühlturm abgekühlt wird, gelangt in der Regel als Fernwärme zu Verbrauchern und dient dort als Nutzwärme für Heizung oder zur Warmwasserbereitung. Somit bieten sich weitaus höhere Wirkungsgrade als bei Kraftwerken, die keine Abwärmenutzung betreiben [3].

|                            |   |
|----------------------------|---|
| <b>LowEx</b>               | Wenn das wärmeabgebende System einen niedrigen Exergie Anteil benötigt, spricht man von LowEx oder auch Niedrig-Exergie Systemen. Ein LowEx System verbraucht somit wenig höherwertige Energie. Typische Systeme sind Kraftprozesse mit Kühltemperaturen von etwa 50-100°C.   |
| <b>Nahwärme</b>            | Eine exakte Definition des Begriffs Nahwärme ist schwierig, da der Begriff Fernwärme diesen subsumiert [7]. Bei Nahwärmesystemen ist jedoch von kleinen Erzeugerleistungen unter 5 MW sowie wenigen Verbrauchern auszugehen. Weiterhin ist die Distanz zwischen Erzeuger und Verbraucher gering. Die eingespeiste Wärme ist in der Regel regenerativen Ursprungs oder es handelt sich um Abwärme aus industriellen Prozessen [7]. |
| <b>Opportunitätskosten</b> | Entgangene Erlöse, die dadurch entstehen, dass vorhandene Möglichkeiten oder Gewinne nicht wahrgenommen werden.   |
| <b>Schluckbrunnen</b>      | Das durch die Wärmepumpe abgekühlte Grundwasser wird dem Schluckbrunnen zugeführt [1].  |
| <b>Transmission</b>        | Durchlässigkeit eines Mediums für Energien wie die Wärmestrahlung [3].  |
| <b>Wärmepumpe</b>          | Eine Wärmepumpe bringt Wärme von einem tieferen Temperaturniveau auf ein höheres Temperaturniveau [1]. Dabei wird einem Medium wie z.B. Wasser durch Kühlen Wärme entzogen. Die entzogene Wärme wird mithilfe eines Verflüssigers an den Heizungskreislauf abgegeben. Dabei ist es von großer Bedeutung, dass die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Heizwärme (Vorlauftemperatur) möglichst gering ist [1].            |

**Wärmeleitung**

Diese Art der Wärmeübertragung benötigt ein Medium, um Wärme übertragen zu können. Diese Verbindung kann sowohl in festen Materialien wie auch in Fluid stattfinden. Bei einer Übertragung mithilfe von Fluid wird auch von Wärmeströmung oder Konvektion gesprochen [8].

**Wärmestrahlung**

Die Wärmestrahlung benötigt für den Wärmetransport kein Medium, da elektromagnetische Wellen als Energieträger dienen. Somit kann auch im Vakuum Wärme von einem Körper zu einem anderen übertragen werden [8].

**Wärmeübertragung**

Wärmeübertragung ist der Transfer von Wärme auf Grund einer Temperaturdifferenz. Dabei kann zwischen Wärmeleitung und Wärmestrahlung unterschieden werden [8].

## **1 Einleitung und Aufgabenstellung**

Steigende Brennstoffpreise, der fortschreitende Klimawandel und der Wunsch nach nachhaltigeren sowie preiswerteren Wärmequellen lassen viele Eigentümer und Unternehmen, wie auch die Westhof Bio-Gemüse GmbH & Co. KG. umdenken.

Neben der Nutzung von Windenergie und Biogas soll nun auch die Abwärme einer geplanten großen Frosterei mit angrenzenden Kühllhallen genutzt werden. Somit soll die Produktion effizienter und nachhaltiger gestaltet werden. Die Abwärme der Kälteanlagen soll mithilfe eines Nahwärmenetzes in eine angrenzende Wohnsiedlung transportiert werden. Der Begriff Nahwärme (Siehe Glossar) wird der Fernwärme (Siehe Glossar) hier explizit vorgezogen, da dies verdeutlichen soll, dass die Strecke zwischen Erzeuger und Verbraucher kurz sowie die übertragene Wärmeleistung relativ gering ist.

In der Wohnsiedlung stehen mehrere Gebäude, die an das Nahwärmenetz angeschlossen werden könnten. Dies ist aus ökonomischen Gründen sinnvoll, wenn sich die Kosten des neu zu bauenden Nahwärmenetzes, einschließlich der zusätzlich notwendigen Heizungstechnik und der Umbaumaßnahmen, nach einer festgelegten Zeit durch die Einsparung an Heizenergie amortisieren. Durch das Wegfallen der privaten Kesselsysteme ergibt sich eine Minderung des  $CO_2$ -Ausstoßes, was auch im ökologischen Sinne ist. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, müssen die Bestandsgebäude untersucht werden und eine sinnvolle Nachrüstung der Heizungs- sowie der Trinkwarmwasserversorgung stattfinden.

In Kapitel zwei und drei werden die üblichen Systeme der Wärmeherzeugung und der Heizkörper kurz erläutert. In Kapitel vier bis sechs werden am konkreten Beispiel der Westhof-Mitarbeiterunterkunft die Gebäudewärme- und Warmwasserversorgung auf der Basis eines in Planung befindlichen Nahwärmenetzes simuliert und vergleichend bewertet. Zum Einsatz kommt dabei das Planungs- und Simulationstool Polysun Simulation Software – Designer, welches in Kapitel sechs kurz vorgestellt wird. Mithilfe von mehreren Experimenten wird bestimmt, welche Maßnahmen eine möglichst effiziente, wirtschaftliche und ökologische Versorgung sowie eine behagliche Wohnatmosphäre versprechen. In den Kapiteln sieben bis acht wird ein Ausblick mit Betrachtung zusätzlicher Wärmeherzeuger sowie -speichermöglichkeiten und ein zusammenfassendes Fazit gegeben.



## **2 Einführung in die Wärmeerzeugung**

Im Folgenden werden die für diese Thesis wichtigen Technologien der heutigen Wärmeerzeugung kurz vorgestellt. Dabei wird die Wärmeerzeugung mit endlichen und regenerativen Ressourcenquellen zur besseren Gegenüberstellung getrennt betrachtet.

### **2.1 Konventionelle Wärmeerzeugung**

Die konventionelle Wärme-Erzeugung findet durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen wie Erdgas, Erdöl oder auch Kohle statt. Mithilfe der Kraft-Wärme-Kopplung (Siehe Glossar) kann zusätzlich die Abwärme von Strom produzierenden Großkraftwerken genutzt werden. Die Abwärme wird dann in der Regel mit einer Fernwärmeleitung zu den Haushalten gebracht. Da die Verbrennung von Kohle in privaten Haushalten aufgrund von starker Rußbildung nicht mehr praktiziert wird, bleiben für die private Heizungsanlage die fossilen Brennstoffe Heizöl und Erdgas übrig [3]. Diese werden in der Regel mithilfe eines Kessels oder eines Blockheizkraftwerks in Wärme umgewandelt. Nachfolgend werden diese kurz beschrieben.

#### **2.1.1 Heizkessel – Eigenschaften und Bauarten**

Die geläufigsten Kessel sind der Konstanttemperaturkessel, der Niedertemperaturkessel und der Brennwertkessel.

##### ***Konstanttemperaturkessel***

Diese Kesselart ist in ihrer Vorlauftemperatur beschränkt. Die Kesseltemperatur wird mithilfe eines Thermostaten möglichst konstant gehalten [9]. Aufgrund der nicht vorhandenen Regelung ist es diesem Kessel auch bei hohen Außentemperaturen nicht möglich, die Kesseltemperatur zu ändern. Diese Kesselart ist stark veraltet und sollte nicht mehr verwendet werden [9]. Bei einer Konstant-Temperatur-Öl-Heizung kann durch Abgas- und Strahlungsverluste lediglich mit einem Wirkungsgrad  $\eta_K$  von 70% gerechnet werden [9].

### ***Niedertemperaturkessel***

Kessel dieser Art sind darauf ausgelegt niedrige Vorlauftemperaturen unter 75°C zu erzeugen. Dabei ist die Vorlauftemperatur abhängig von der Außentemperatur oder ähnlichen Führungsgrößen sowie der Zeit. Der Niedertemperaturkessel erreicht einen Wirkungsgrad von bis zu 91% [3].

### ***Brennwertkessel***

Diese Kesselform erzielt zusätzlich durch die Nutzung der im Abgas enthaltenen Latentwärme Energieeinsparungen. Der Brennwertkessel wird sofern möglich standardmäßig in Deutschland eingesetzt. Der Wirkungsgrad kann bis zu 100% betragen [3].

## **2.1.2 Blockheizkraftwerke und die Eigenschaften**

Blockheizkraftwerke (BHKW) sind Motoren, die in der Regel mit Gas oder Diesel betrieben werden [3]. Aufgrund ihrer Eigenschaften werden BHKW überwiegend in Bereichen eingesetzt, wo Strom und Wärme benötigt werden. Somit eignen sich am besten Betriebe oder Gebäude, in denen ständig Strom und Wärme benötigt wird und die mittlere Außentemperatur nicht zu hoch ist. In Deutschland muss z.B. etwa 3/4 des Jahres geheizt werden [3]. Für den wirtschaftlichen Betrieb muss sichergestellt werden, dass sich das BHKW nicht zu häufig an- und ausschaltet, da der Verschleiß zunehmen würde. Weiterhin sollte das BHKW eine gewisse Mindestbetriebszeit im Jahr wie z.B.  $3000 \frac{h}{a}$  aufweisen [3].

## **2.2 Regenerative Wärmeerzeugung**

Die regenerative Wärme-Erzeugung bietet ein breites Spektrum an Wärmequellen. Wie auch bei der konventionellen Erzeugung kann Wärme durch die Verbrennung von nachwachsenden Rohstoffen wie z.B. Holz oder Biogas, welches in der Regel aus Biomasse gewonnen wird, erzeugt werden. Weiterhin kann die Sonnenstrahlung durch Solarthermie, die Erdwärme durch Geothermie oder auch die Luft mithilfe von Wärmetauschern zur Wärmegenerierung genutzt werden. Für die weitere Betrachtung sind vor allem die Geothermie und die Wärmegewinnung aus der Luft (Aerodynamische Energiegewinnung) interessant, da diese eine einfache preiswerte Möglichkeit bieten die Vorlauftemperatur im Heizungskreislauf zu erhöhen. Die Solarthermie wird aufgrund der sonnenabhängigen Erzeugung und den damit verbundenen kurzen Heizperioden nicht weiter betrachtet.

### 2.2.1 Geothermie – Eigenschaften und Nutzungsmöglichkeiten

Vor allem die Nutzung der Geothermie hat sich durch nahezu konstante Temperaturen und hohe Wirkungsgrade als gute Alternative zu konventionellen Systemen erwiesen [1]. Um die Erdwärme nutzbar zu machen, werden in der Regel mit einer Sole oder Wasser gefüllte Leitungen in die Erde oder das Grundwasser integriert. Diese agieren mit Wärmepumpen (Siehe Glossar), welche das Niveau einer Vorlauftemperatur erhöhen können [1]. Zu den am meisten verwendeten Bauarten zählen Förder- und Schluckbrunnen (Siehe Glossar), Erdkollektoren und Erdsonden.

#### **Förder- und Schluckbrunnen**

Die Kombination eines Förder- und Schluckbrunnens mit einer Wasser-Wasser-Wärmepumpe stellt oft eine gute Wahl dar, da über das ganze Jahr nahezu konstante Temperaturen des Grundwassers herrschen und bei richtiger Dimensionierung ein hoher Wirkungsgrad möglich ist [1]. In Abbildung 2.1 ist ein Förder- und Schluckbrunnen mit einer Wasser-Wasser-Wärmepumpe dargestellt.

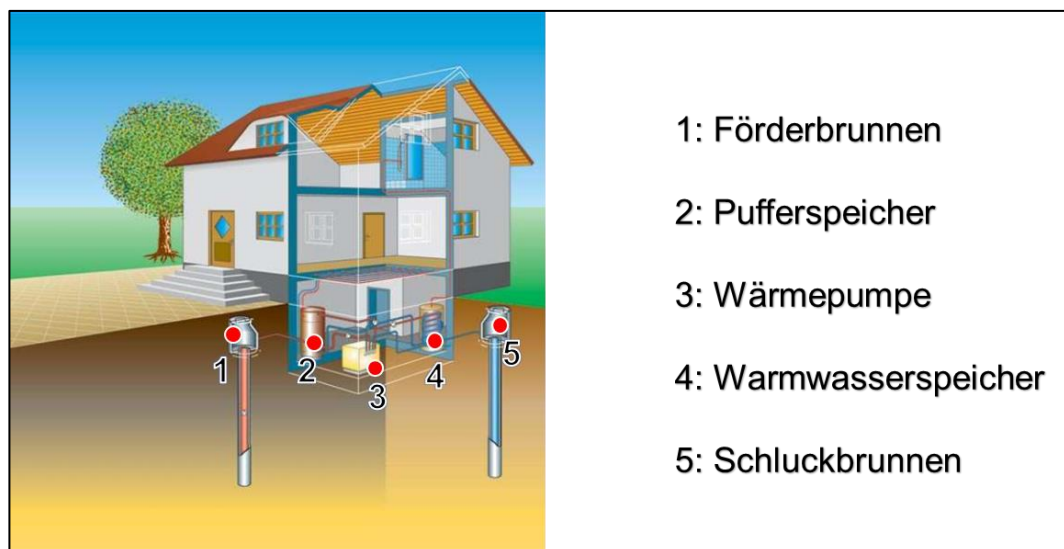


Abbildung 2.1: Förder- und Schluckbrunnen mit Wasser-Wasser-Wärmepumpe [1]

Der Nachteil dieser Bauart ist, dass Grundwasser benötigt wird und eine stärker limitierte Lebensdauer im Vergleich zu Erdsonde oder -Kollektor besteht [1].

## **Erdkollektor**

Die preiswerteste Variante der drei Bauarten ist die Wahl eines Erdkollektors. Bei dieser Variante wird ein Rohrsystem in maximal 2 m Tiefe verlegt. Eine Sole wird in das Rohrsystem gefüllt und mithilfe einer Umwälzpumpe durch das System gepumpt. Eine Sole-Wasser-Wärmepumpe entzieht der Sole und somit dem Erdreich die benötigte Wärme [1]. Diese Bauart besitzt eine lange Lebensdauer. In Abbildung 2.2 ist ein Erdkollektor mit einer Sole-Wasser-Wärmepumpe dargestellt.

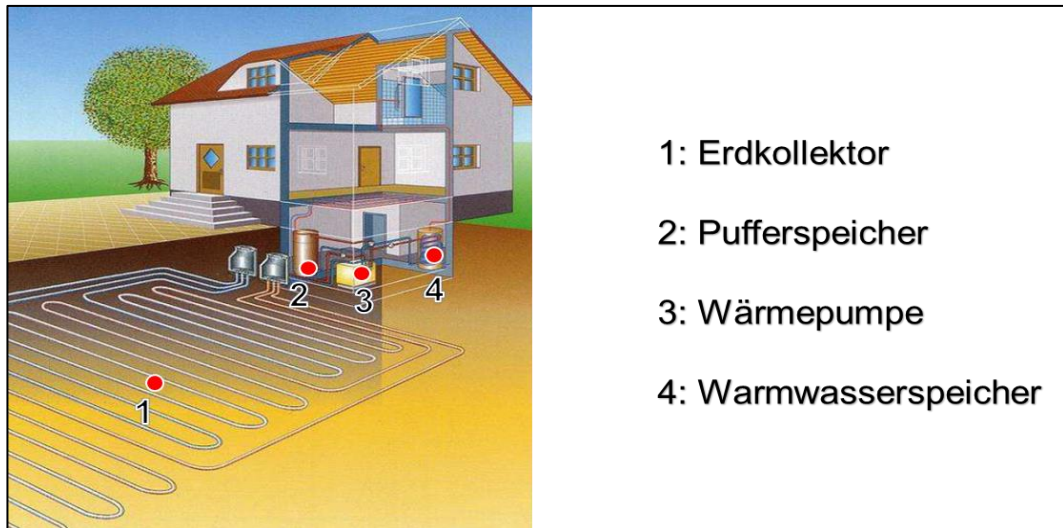


Abbildung 2.2: Erdkolllektor mit Sole-Wasser-Wärmepumpe [1]

Durch die über das Jahr variablen Außentemperaturen wird das Erdreich in zwei Meter Tiefe stark beeinflusst. Deshalb ist es nicht möglich eine Kühlung im Sommer zu realisieren [1]. Der Wirkungsgrad ist deutlich geringer als die der Wasser-Wasser-Wärmepumpe mit Förder- und Schluckbrunnen. Weiterhin besteht die Gefahr einer Vereisung des Erdreiches durch zu starken Wärmeentzug in den Wintermonaten [1].

## **Erdsonde**

Die Nutzung von Erdsonden ist ähnlich der Erdkollektorbauweise. Der große Unterschied ist, dass die Erdsonden tiefer verlegt werden und somit konstantere Temperaturen herrschen, was den Wirkungsgrad positiv beeinflusst und die Nutzung von freier Kühlung im Sommer ermöglicht [1]. Der Bau ist an fast jedem Standort möglich und Erdsonden sind in der Regel sehr langlebig. In der folgenden Abbildung 2.3 ist eine Erdsonde mit einer Sole-Wasser-Wärmepumpe dargestellt.

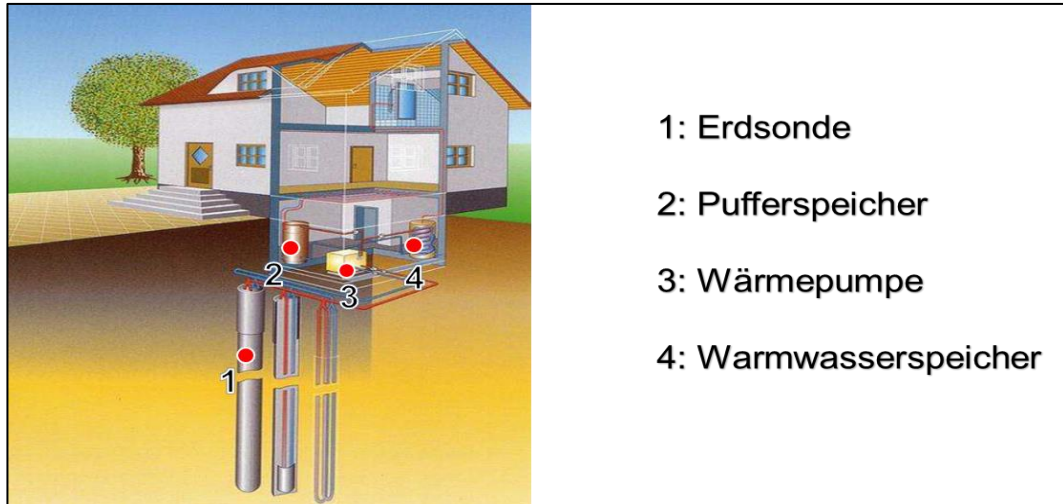


Abbildung 2.3: Erdsonde mit Sole-Wasser-Wärmepumpe [1]

Der Nachteil dieser Bauart ist, dass sie durch hochwertige Sonden und aufwendige Bohrungen sehr teuer ist. Der Wirkungsgrad dieser Variante ist deutlich geringer als die der Wasser-Wasser-Wärmepumpe mit Förder- und Schluckbrunnen, jedoch besser als der des Erdkollektors [1]. In bestimmten geologischen Risikogebieten besteht die Gefahr auf quellfähige Materialien wie Anhydrid zu stoßen. Bei Kontakt von Anhydrid mit Wasser entsteht Gips. Da dadurch ein größeres Volumen entsteht, wird das Erdreich nach oben gedrückt. In dem Ort Staufen verschiebt sich seit der Erdwärmebohrung in 2007 stetig der Boden. Dies führte bereits zu Schäden im zweistelligen Millionenbereich [10].

### 2.2.2 Aerodynamische Energiegewinnung

Ähnlich wie bei der Geothermie wird einem Medium, in diesem Fall der Luft, Wärme entzogen. Mithilfe von Ventilatoren werden große Mengen Luft eingesaugt, mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe abgekühlt und wieder ausgeblasen [1]. Vor allem bei bestehenden Gebäuden sind die einfache Installation und der geringe Preis von großem Vorteil. In der folgenden Abbildung 2.4 ist eine Luft-Wasser-Wärmepumpenanlage dargestellt.

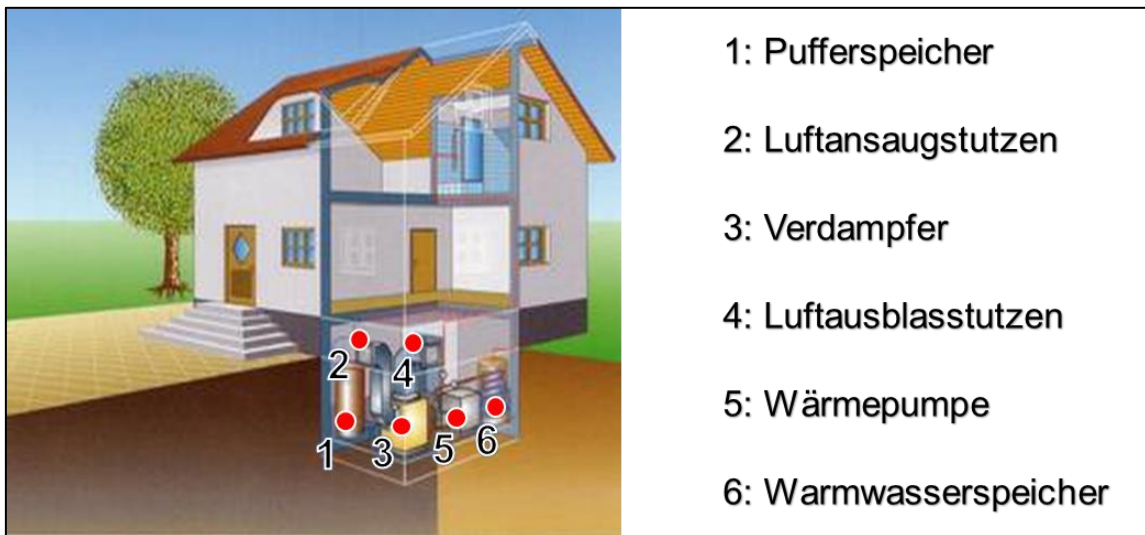


Abbildung 2.4: Luft-Wasser-Wärmepumpenanlage [1]

Ein Nachteil dieser Bauweise ist der mitunter schlechte Wirkungsgrad, der durch die Außentemperatur vor allem in kalten Jahresabschnitten abnimmt [1].

### **3 Heizkörper und Blick auf das menschliche Wohlbefinden**

Nachfolgend werden die Eigenschaften unterschiedlicher Heizkörper und deren Einfluss auf den menschlichen Körper beleuchtet.

#### **3.1 Eigenschaften von Heizkörpern**

Es folgt die Betrachtung der Wärmeübertragungsarten von unterschiedlichen Hezelementarten.

##### **3.1.1 Wärmeverteilung über Wärmeleitung**

Konventionelle Heizkörper sowie Lüftungs- und Gebläse-Radiatoren übertragen die Wärme mithilfe der Wärmeleitung (Siehe Glossar) oder auch Wärmeströmung. Dabei transportiert die Luft im Raum die Wärme und verteilt diese durch thermischen Auftrieb (Konvektion) oder mit einer durch Lüfter erzeugten Strömung. Die Wärmeströmung ist unter anderem von der Temperaturdifferenz zwischen Heizkörper und Raumluft, der beheizten Fläche, sowie der Strömungsgeschwindigkeit abhängig. Bei einer niedrigen Strömung sind somit höhere Temperaturunterschiede zwischen Heizkörper und Raumluft nötig, um eine ausreichend große Heizleistung zu erhalten [3]. Damit lassen sich die benötigten hohen Vorlauftemperaturen konventioneller Radiatoren erklären. Gebläseradiatoren hingegen benötigen keine Konvektion und somit auch keine großen Temperaturunterschiede zwischen Heizkörper und Raumluft.

##### **3.1.2 Wärmeverteilung über Wärmestrahlung**

Bei Flächenheizungen wie Fußboden- oder speziellen Wandheizungen wird die Wärme überwiegend durch Strahlung übertragen. Beim Auftreffen der Strahlungsenergie auf einen Körper wird diese, sofern es sich nicht um einen reflektierenden Körper handelt, absorbiert und in Wärmeenergie umgewandelt [3]. Da Wärmestrahlung (Siehe Glossar) kein Medium für die Übertragung benötigt, sind bereits kleine Temperaturunterschiede ausreichend um eine angenehme Empfindungstemperatur zu erzeugen [3]. Deshalb sind Flächenheizungen sehr gut für niedrige Vorlauftemperaturen geeignet.

### **3.2 Empfindung des menschlichen Körpers**

Bei der Wärmeversorgung von Gebäuden spielt das Wohlbefinden des Nutzers eine erhebliche Rolle. Dieses Wohlbefinden kann durch die folgenden Einflussgrößen beeinträchtigt werden [3]:

- Raumlufttemperatur
- Oberflächentemperatur der Umschließungsflächen (Fußboden, Wände, etc.)
- Luftfeuchte
- Luftbewegung
- Luftqualität
- Lärm

Besonders Strahlungsenergie wird als angenehm empfunden, während Wärme-  
strömung vor allem bei falscher Dimensionierung dazu neigt, eine störende Strömung  
zu erzeugen [3].

Weiterhin benötigen konventionelle-, sowie elektrische Radiatoren eine höhere  
Vorlauftemperatur als Flächenheizungen. Die dabei entstehende Wärme kann vor  
allem in Heizperioden die Luft austrocknen und sorgt häufig für stickige Luft.



## **4 Bestandsaufnahme und Untersuchung der Gegebenheiten**

In diesem Kapitel werden die vorhandenen Daten des Bestandsgebäudes und Nahwärmenetzes aufgelistet und erläutert. Außerdem wird der Warmwasserverbrauch sowie der Heizwärmebedarf der Mitarbeiterunterkunft ermittelt und das Zusammenspiel zwischen Wärmeproduzent, -verteilnetz und -verbraucher dargestellt.

### **4.1 Eigenschaften der Mitarbeiterunterkunft**

Durch eine Vor-Ort-Begehung und den Erhalt weiterer Daten durch den Eigentümer konnten die Verbräuche und Eigenschaften des Gebäudes sowie der vorhandenen Heizungstechnik bestimmt werden.

Bei dem zu untersuchenden Gebäude handelt es sich um eine Mitarbeiterunterkunft, die erntebedingt unterschiedlich besetzt ist. Von Oktober bis April (sieben Monate) halten sich lediglich zehn Personen in der Unterkunft auf. Von Mai bis September (fünf Monate) befinden sich 35 Personen vor Ort [11].

Das Gebäude wurde 1970 erbaut und befindet sich in Wöhrden, Schleswig-Holstein [11]. Dieses setzt sich aus einem unbeheizten Heizungskeller, einem Eingangs- und Lokalbereich, einer Küche und Sanitäranlagen im Erdgeschoss, sowie einigen Schlafzimmern und Sanitäranlagen in den oberen Stockwerken zusammen.

Da kein Gebäudeplan existiert, wurden die angegebenen Flächen weitgehend ausgemessen. Vor allem im Dachbereich war dies jedoch nicht möglich. Hier wurden die Flächen abgeschätzt. Die zu beheizende Fläche beträgt ca. 390m<sup>2</sup> auf drei Etagen verteilt. Weiterhin gibt es einen unbeheizten Heizungskeller mit einer Fläche von 130m<sup>2</sup>. Das Dach weist keinerlei Isolierung auf. Die Fassade wurde bei Sanierungsarbeiten lediglich mit einer Einblasdämmung versehen [11]. Die Fenster sind doppelt-verglast. Bei der installierten Heizungsanlage handelt es sich um eine veraltete Konstant-Temperatur-Öl-Heizung aus den späten Sechzigern. Da lediglich drei Öllieferungen von 2017/18 bekannt waren, wurden die Öllieferungen (orange Punkte) kumuliert und der jährliche Ölverbrauch mithilfe einer linearen Regression in Abbildung 4.5 angenähert [11] [12]. Die Kumulierung entsteht unter der Annahme, dass die gelieferte Ölmenge bis zum nächsten Liefertermin verbraucht wird.

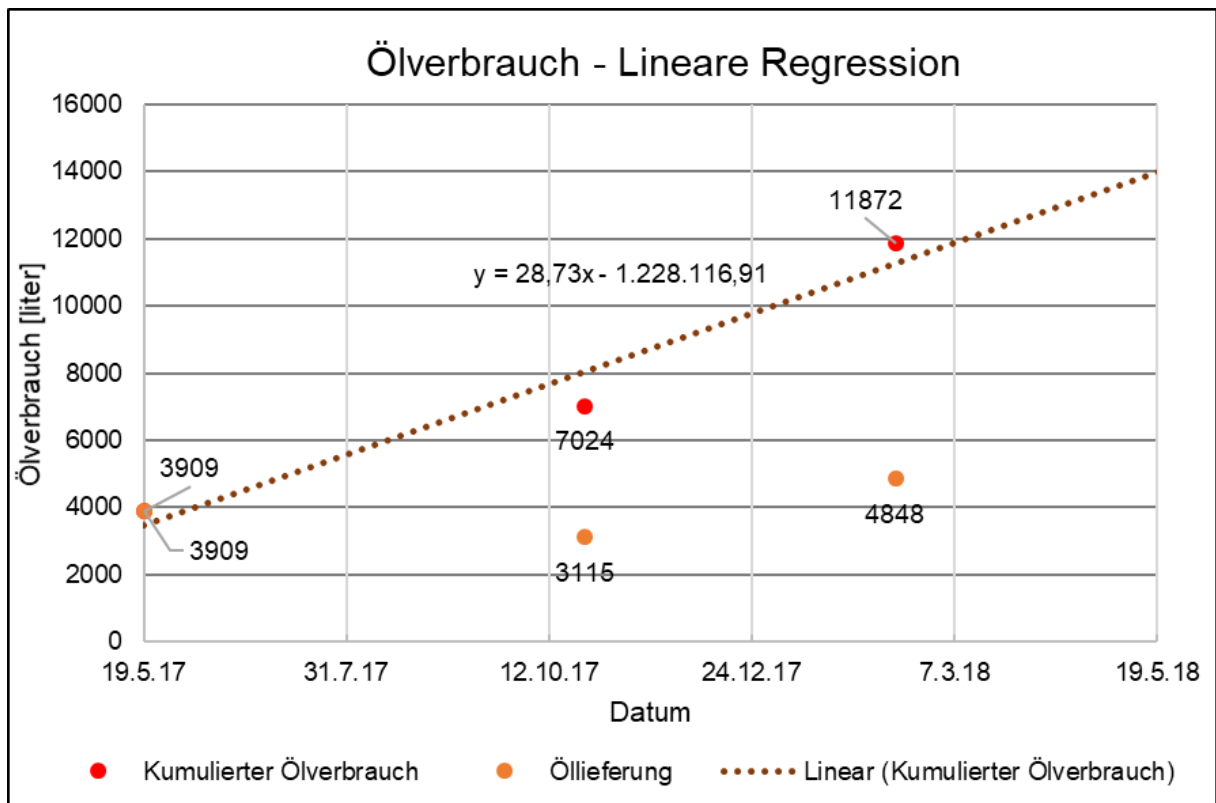


Abbildung 4.5: Ermittlung des Ölverbrauchs mit linearer Regression [12]

In Abbildung 4.5 sind die kumulierten Ölverbrauchswerte als rote Punkte markiert. Mithilfe einer linearen Regression wurden diese Punkte einander angeglichen und die entstandene Gerade auf ein Jahr gestreckt [12]. Beim Ende des dargestellten Intervalls (am 19.05.18), kann auf der Ordinate der Verbrauch pro Jahr entnommen werden. Im Jahr 2017 betrug der Ölverbrauch somit etwa 14.000 l. Die Heizungsanlage ist an einen in die Jahre gekommenen Trinkwarmwasserspeicher mit einem geschätzten Volumen von ca. 500l angeschlossen. Der gesamte Wasserverbrauch pro Jahr beträgt 974,333 m<sup>3</sup> über die letzten drei Jahre gemittelt [11]. Im April 2018 wurde die Vorlauftemperatur der Heizung mit 64°C und die Rücklauftemperatur mit 48°C bestimmt. Da es sich um eine Konstant-Temperatur-Heizung handelt, wird davon ausgegangen, dass die gemessenen Temperaturen nahezu konstant bleiben. Diese hohen Temperaturen werden benötigt, um konventionelle Radiatoren zu betreiben.

Nachfolgend ist das zu untersuchende Objekt aufgeführt (Abbildung 4.6).



Abbildung 4.6: Ansicht der Mitarbeiter-Unterkunft

#### **4.2 Ermittlung des Warmwasserverbrauchs**

Da es sich um eine Mitarbeiterunterkunft für die Gemüseernte und Verarbeitung handelt, befinden sich zu bestimmten Zeiten etwa dreimal so viele Menschen in dem Gebäude wie in der restlichen Zeit. Da körperlich gearbeitet wird, kann davon ausgegangen werden, dass die anwesenden Personen die Duschen stark frequentieren.

Nachfolgend ist eine Grafik aufgeführt, die den Einsatz des Trinkwassers im Jahr 2013 im Haushalt und Kleingewerbe zeigt (Abbildung 4.7).

### Wasserverwendung im Haushalt 2013

Durchschnittswerte, bezogen auf die Wasserabgabe an Haushalte und Kleingewerbe

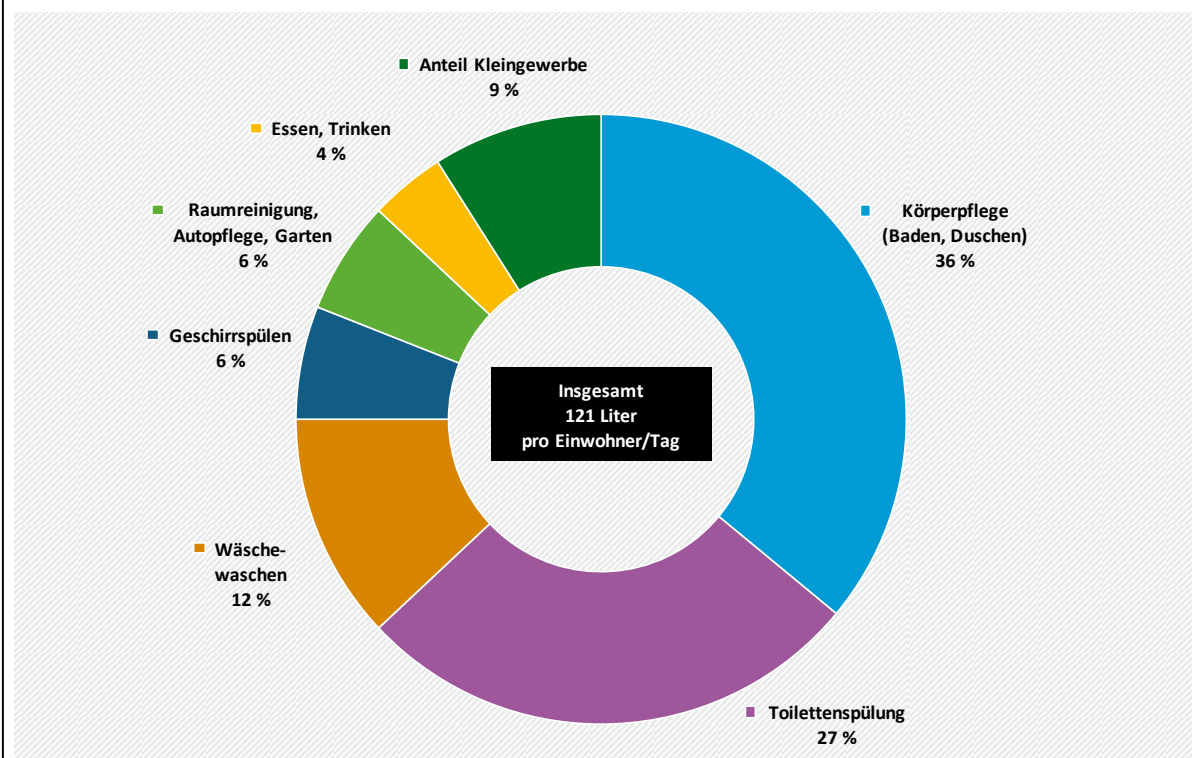


Abbildung 4.7: Wasserverwendung pro Einwohner am Tag [13]

Die prozentuale Verteilung der Wasserverwendung von 2013 wird auch für das Jahr 2017 angenommen. Da die Bewohner der Unterkunft weder Kleingewerbe noch Garten besitzen, fallen diese beiden Verbrauchskategorien für die Warmwasserermittlung weg. Weiterhin wird die Toilettenspülung, die Waschmaschine, wie auch die Geschirrspülmaschine in der Regel mit Kaltwasser betrieben. Somit bleiben für die Warmwasserbetrachtung mit Essenszubereitung sowie der Körperpflege 40% des täglichen Verbrauchs übrig.

Um den Warmwasserverbrauch pro Jahr zu erhalten, wird die Trinkwassermenge pro Jahr mit dem berechneten Warmwasserprozentsatz multipliziert.

$$974,333 \frac{\text{m}^3}{\text{a}} * 40\% = 389,733 \frac{\text{m}^3}{\text{a}} \quad (4.1)$$

Eingesetzt in die Gleichung (4.1) beträgt der Warmwasserbedarf pro Jahr 389.733 l.

In der folgenden Abbildung 4.8 ist der für die Mitarbeiterunterkunft spezifische Warmwasserverbrauch konkret dargestellt.

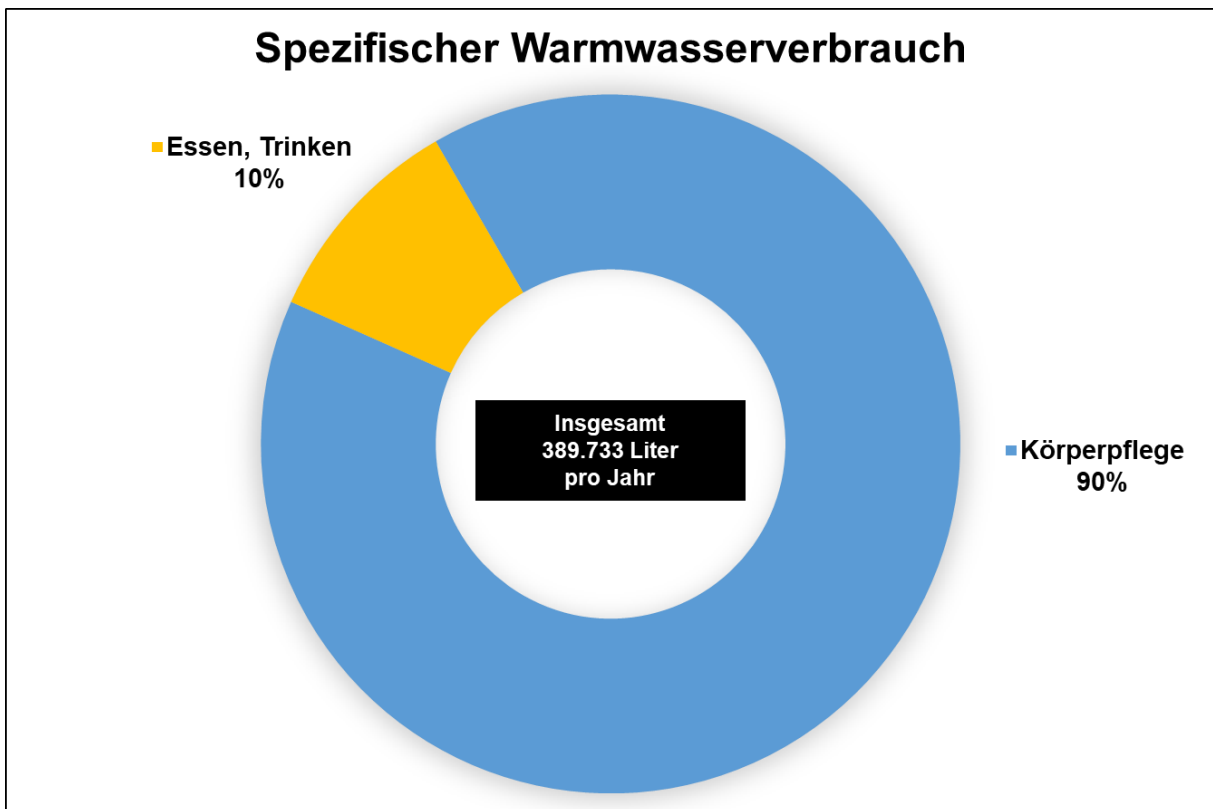


Abbildung 4.8: Spezifischer Warmwasserverbrauch der Mitarbeiter Unterkunft

Das Warmwasser wird mithilfe der Konstant-Temperatur-Öl-Heizung erhitzt.

Der Warmwasserspeicher hat Wärmeverluste, diese Bereitschaftsverluste betragen bei einem Volumen von 500 l etwa 2,8 kWh pro Tag [14]. Die Zirkulationsverluste des Heizungskreises betragen je nach verwendeter Dämmung und Rohrsystemen bis zu 60% [15].

Mithilfe einer Plausibilitätsrechnung werden nachfolgend die Zirkulationsverluste berechnet. Die Rohrlänge des Trinkwarmwassers kann in guter Näherung durch die doppelte Höhe des Hauses + 10% bestimmt werden. Die doppelte Höhe kommt durch den Vor- und Rücklauf zum höchsten Heizelement zustande und die zusätzlichen 10% werden für die Länge der Heizelementanschlussleitungen angenommen.

$$l_R = 2 * \text{Höhe des Gebäudes} + 10\% \quad (4.2)$$

Durch Einsetzen in Gleichung (4.2) ergibt sich bei einer Gebäudehöhe von acht Metern eine Rohrlänge  $l_R$  von 16,8m. Die Vorlauftemperatur  $t_V$  der Heizung beträgt  $64^\circ\text{C}$  und die Raumtemperatur  $t_{Raum}$  beträgt  $20^\circ\text{C}$ .

$$\Delta t = t_V - t_{Raum} \quad (4.3)$$

Durch Einsetzen in die Gleichung (4.3) ergibt sich ein  $\Delta t$  von 44 K.

Für die bisher im Gebäude verwendete Rohrdämmung wird ein Wärmedurchgangskoeffizient von  $0,04 \frac{W}{m \cdot K}$  und eine Dicke von einem Zentimeter angenommen. Für die Rohrdicke ohne Dämmung wird im Durchschnitt ein Außendurchmesser von vier Zentimetern angenommen.

Der Wärmedurchgangskoeffizient  $U_R$  für das gedämmte Rohr wird mit der folgenden Gleichung (4.4) berechnet [16].

$$U_R = \frac{\pi}{\frac{1}{2 * \lambda_D} * \ln\left(\frac{d_{a,D}}{d_a}\right) + \frac{1}{\alpha_a * d_{a,D}}} \quad (4.4)$$

Die spezifische Wärmeabgabe pro Meter berechnet sich nach der folgenden Formel (4.5) [16].

$$q_W = U_R * \Delta t \quad (4.5)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (4.4) in die Gl (4.5), entsteht die Formel (4.6).

$$q_W = \frac{\pi * \Delta t}{\frac{1}{2 * \lambda_D} * \ln\left(\frac{d_{a,D}}{d_a}\right) + \frac{1}{\alpha_a * d_{a,D}}} \quad (4.6)$$

$q_W$  : spezifische Wärmeabgabe pro Meter Leitung in W

$\Delta t$  : Temperaturdifferenz

$\lambda_D$  : Wärmeleitfähigkeit der Dämmung in  $\frac{W}{m \cdot K}$

$d_{a,D}$  : Außendurchmesser der Dämmung in m, = 0,05 m

$d_a$  : Innendurchmesser der Dämmung in m, = 0,04 m

$\alpha_a$  : äußerer Wärmeübergangskoeffizient =  $10 \frac{W}{m \cdot K}$  nach Din 1988-300 [16]

Durch Einsetzen der Werte in die Gleichung (4.6) ergibt sich ein Wärmeverlust  $q_W$  pro Meter von 24,78 W. Um den gesamten Zirkulationsverlust zu erhalten, muss die spezifische Wärmeabgabe pro Meter mit der Gesamtrohrlänge und mit den Stunden im Jahr multipliziert werden. Somit ergibt sich der gesamte Zirkulationsverlust mit folgender Formel.

$$Q_{ZVGesamt} = q_W * l_R * \frac{\text{Stunden}}{\text{Tag}} * \frac{\text{Tage}}{\text{Jahr}} \quad (4.7)$$

Eingesetzt in die Gleichung (4.7) ergeben sich Zirkulationsverluste  $Q_{ZVGesamt}$  von  $3,65 \frac{MWh}{a}$ . Um die Frischwassertemperatur  $t_{Erde}$  der erdverlegten Leitung zu erhalten,

muss die Bodentemperatur näher betrachtet werden. Um die Bodentemperatur von Wöhrden zu erhalten, werden die langjährigen gemittelten Bodentemperaturen in 1m Tiefe betrachtet. Die hier verwendete Untersuchung der Bodentemperaturen wurde in Nordrhein-Westfalen durchgeführt. Da sich Wöhrden nördlicher als Nordrhein-Westfalen befindet, wird die Temperatur tendenziell niedriger angenommen. In Münster beträgt die Bodentemperatur 10,22 °C und in Bocholt liegt diese bei 11,03°C [17]. Es wird daher eine Frischwassertemperatur  $t_{Erde}$  im Mittel von 10°C angenommen. Weiterhin wird eine allgemein übliche Duschtemperatur von 40°C angenommen. Bei einer Solltemperatur  $t_2$  von 40°C müsste das Frischwasser um 30 K angehoben werden. Mit der Gleichung (4.8) kann die nötige Energie zur Erhitzung des gesamten Trinkwarmwassers im Jahr berechnet werden [16].

$$Q_{WW} = \frac{\text{Gesamtes Wasser} * c_{p,W} * (t_2 - t_{Erde})}{3,6} \quad (4.8)$$

Mithilfe des Umrechnungsfaktor 3,6 wird kJ in kWh umgewandelt [4].

$c_{p,W}$  : Wärmekapazität von Wasser =  $4,180 \frac{kJ}{kg * K}$  [6]

Wenn die Werte in die Gleichung (4.8) eingesetzt werden, ergibt sich die Energie  $Q_{WW}$  zum Erhitzen des gesamten Warmwassers zu 13,51 MWh.

Die Zirkulationsverluste  $Z_V$  werden mit der Gleichung (4.9) berechnet.

$$Z_V = \frac{Q_{ZVGesamt}}{Q_{WW} * 100} \quad (4.9)$$

Eingesetzt in die Gleichung (4.9) betragen die Zirkulationsverluste 28,283%. Im Vergleich dazu wären die Zirkulationsverluste von maximal 60% aus der Studie für diesen Fall der Mitarbeiterunterkunft zu hoch angesetzt gewesen.

Die gesamte Energie zur Warmwassererhitzung in einem Jahr mit Beachtung der Bereitschafts- und der Zirkulationsverluste berechnet sich nach Gleichung (4.10).

$$Q_{WWGesamt} = Q_{WW} + 2,8 \text{ kWh} * 365 + Q_{ZVGesamt} \quad (4.10)$$

Somit beträgt die gesamte benötigte Energie  $Q_{WWGesamt}$  zur Warmwassererhitzung mit Betrachtung der Verluste  $18,18 \frac{MWh}{a}$ . Die berechnete Energie zur Warmwassererhitzung befindet sich in einem für Unterkünfte realistischen Rahmen und wird nachfolgend für die weitere Berechnung und die Simulation benötigt.

### 4.3 Ermittlung des Wärmeverbrauchs

Da für das Gebäude kein Energieausweis vorhanden ist, wird der aktuelle Heizwärmebedarf über zwei Methoden bestimmt. Zuerst wird der Heizwärmebedarf mithilfe der Gebäudeeigenschaften und der Warmwassererhitzung und den jeweiligen Systemverlusten auf Grundlage der Wärmeschutzverordnung von 1995 (WSVO95) berechnet [18]. Zur Verifikation und zum Vergleich wird der Heizwärmebedarf weiterhin mithilfe des Heizölverbrauchs berechnet und mit dem zuvor bestimmten Wert verglichen.

Der Wärmebedarf eines Gebäudes ist von vielen Faktoren abhängig. Die Wahl der Innentemperatur, die Dämmung des Gebäudes, das Lüftungsverhalten des Nutzers und weitere Kriterien können den Bedarf beeinflussen. In der nachfolgenden Abbildung sind die Gewinne und Verluste eines Gebäudes vereinfacht dargestellt (Abbildung 4.9).

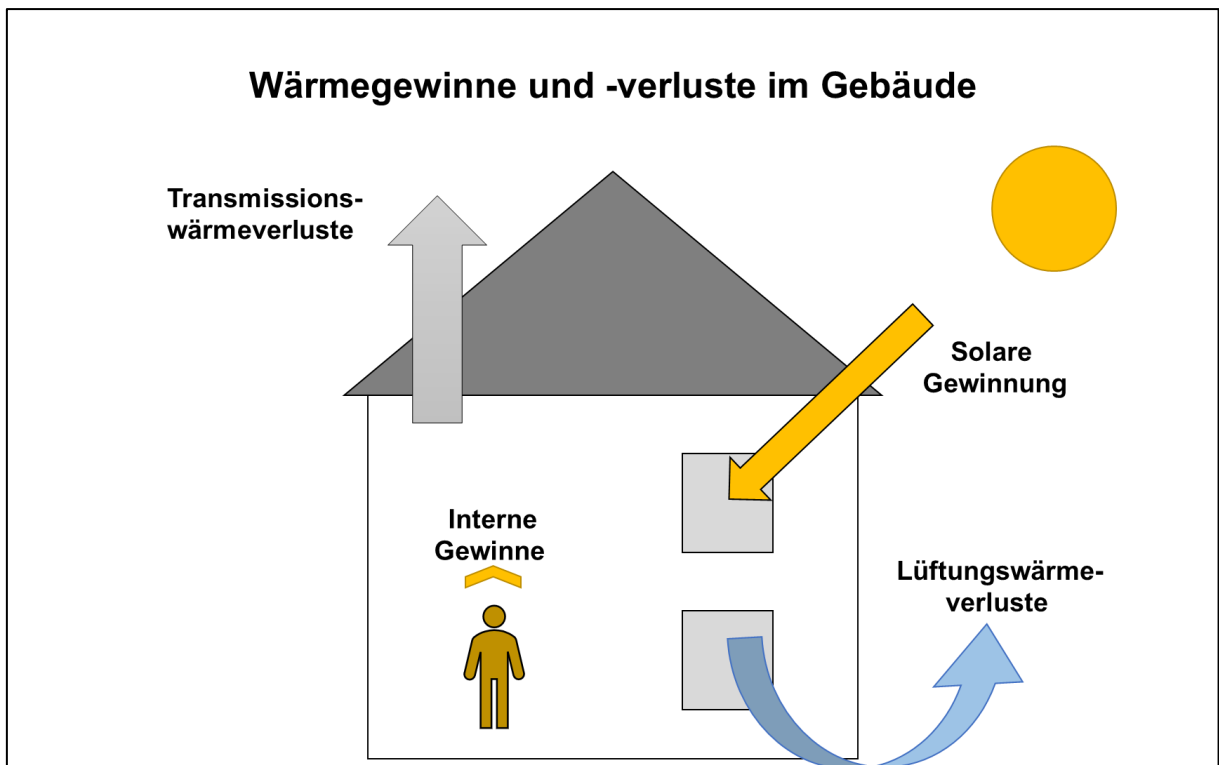


Abbildung 4.9: Skizze der Wärmegewinne und -verluste eines Gebäudes

Die Transmissionswärmeverluste  $Q_T$  (Siehe Glossar) und Lüftungswärmeverluste  $Q_L$  stellen die Verluste dar. Die internen Gewinne  $Q_I$  ergeben sich aus der Abwärme elektrischer Geräte und Personen. Die solare Gewinnung wird in der nachfolgenden Berechnung, zur Vereinfachung aufgrund der geringen Auswirkungen nicht weiter betrachtet.



### 4.3.1 Berechnung des Heizwärmebedarfs auf Grundlage der WSV095

Die Wärmeschutzverordnung von 1995 ist zwar nicht mehr gültig, jedoch bieten die dort angewandten Berechnungsverfahren weiterhin eine gute Grundlage für übersichtliche und praxistaugliche Abschätzungen. Die Nachweisverfahren der heutigen EnEV sind weitaus komplexer und für Abschätzungen mit geringer Datengrundlage für diesen Fall ungeeignet.

Die Summe der nach außen gerichteten Transmissionswärmeverluste des Gebäudes lassen sich mithilfe der Gradtagszahl  $G_T$  und des Wärmedurchgangskoeffizienten  $U$  berechnen. Weiterhin kann die Summe der Lüftungswärmeverluste mit Berücksichtigung der Gebäudedichtigkeit und die internen Gewinne mit gemittelten Anhaltswerten bestimmt werden [18].

Die Gradtagszahl der Wetterstation Hamburg Flughafen beträgt gemittelt über mehrere Jahre  $3837 \text{ K} \cdot \frac{\text{d}}{\text{a}}$  [12]. Die Gradtagszahl wird auch für Wöhrden angenommen. Nachfolgend wird eine Tabelle (Tabelle 4.1) aufgestellt, die zur Ermittlung des Heizwärmebedarfs dient [18].

Tabelle 4.1: Ermittlung des Heizwärmebedarfs [18]

| Wärmeverlust<br>über                               | $A_i$<br>[m <sup>2</sup> ] | $U_i$<br>[W/m <sup>2</sup> *K] | $G_T$<br>[K*d/a] | $Q_T$<br>[kWh/a] |
|--|----------------------------|--------------------------------|------------------|------------------|
| Fassade  | 242                        | 1,0                            | 3837             | 22285,30         |
| Außenfenster                                       | 42                         | 3,0                            | 3837             | 11603,09         |
| Außentür   | 6,2                        | 3,5                            | 3837             | 1998,31          |
| Dach   | 150                        | 1,4                            | 3837             | 19338,48         |
| Kellerdecke  | 130                        | 1,0                            | 3837             | 11971,44         |
| $\Sigma$ Transmissionswärmeverluste $\Sigma Q_T =$ |                            |                                |                  | 67196,61         |
| Lüftungswärmeverluste $Q_L =$                      |                            |                                |                  | 19537,39         |
| Interne Gewinne $Q_I =$                            |                            |                                |                  | 7800             |
| Heizwärmebedarf $Q_H =$                            |                            |                                |                  | 78934,00         |
| Primärheizenergiebedarf $Q_{GW} =$                 |                            |                                |                  | 112762,86        |

$A_i$  : Außenfläche der Bauteile

$U_i$  : Wärmedurchgangskoeffizient der jeweiligen Bauteile [18]

$Q_T$  : Transmissionsverlust [18]

$$Q_T = A_i * U_i * G_T * \frac{24}{1000} \quad (4.11)$$

$Q_L$  : Lüftungsverluste [18]

$$Q_L = \rho_L * c_{p,L} * \beta * G_T * \frac{24}{1000} * V_L \quad (4.12)$$

$V_L$  : Belüftetes Netto-Volumen [18]

$$V_L = 0,8 * V_b \quad (4.13)$$

$V_b$  : Brutto-Volumen [18]

$$V_b = \text{unbeheizte Fläche} * \text{Höhe} \quad (4.14)$$

Mit einer unbeheizten Fläche von 390 m<sup>2</sup> und einer Höhe von 2,5 m ergibt sich eingesetzt in Gleichung (4.14) ein Brutto-Volumen  $V_b$  von 975 m<sup>3</sup>

$\beta$  : Luftwechselzahl [18]

$$\beta = 0,8 \text{ h}^{-1} \quad (4.15)$$

$\rho_L * c_{p,L}$  : Dichte von Luft \* Wärmekapazität der Luft ( $\approx 0,34 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3 * \text{K}}$ ) [18]

$Q_I$  : Interne Gewinne [18]

$$Q_I = 8 * V_b \quad (4.16)$$

$Q_H$  : Heizwärme [18]

$$Q_H = \sum Q_T + Q_L - Q_I \quad (4.17)$$

$Q_{GW}$  : Primärheizenergiebedarf [18]

$$Q_{GW} = \eta_K * Q_H \quad (4.18)$$

Eingesetzt in die Gleichung (4.18) beträgt die Primärheizenergie  $Q_{GW}$  des Gebäudes  $106,72 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}$ . Die nötige Endenergie  $Q_{EG}$  setzt sich aus dem Heizwärmebedarf des Gebäudes und der nötigen Energie zur Warmwasserbereitung zusammen.

$$Q_{EG} = Q_H + Q_{WW\text{Gesamt}} \quad (4.19)$$

Eingesetzt in die Gleichung (4.19) beträgt die Endenergie  $Q_{EG}$  somit  $97,11 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}$ . Die nötige Primärgesamtheizenergie  $Q_{PE}$  kann mit Gleichung (4.20) berechnet werden.

$$Q_{PE} = Q_{GW} + \frac{Q_{WW\text{Gesamt}}}{\eta_K} \quad (4.20)$$

Eingesetzt ergibt sich eine nötige Gesamtprimärenergie  $Q_{PE}$  von  $138,73 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}$ .

### 4.3.2 Berechnung des Heizwärmebedarfs auf Grundlage des Ölverbrauchs

Um die mögliche Wärme durch die Verbrennung von Öl zu berechnen wird folgende Formel verwendet.

$$Q_{\dot{O}L} = \text{Ölverbrauch} * \text{ÖlHeizwert} \quad (4.21)$$

Bei einem Ölverbrauch von rund 14.000 l im Jahr und einem Öl-Heizwert von  $10 \frac{kWh}{l}$  würde beim Verbrennen eine Wärme  $Q_{\dot{O}L}$  von  $140 \frac{MWh}{a}$  Primärenergie entstehen [3]. Die Differenz der Primärenergie von 1,23 MWh zwischen  $Q_{\dot{O}L}$  und  $Q_{PE}$ , könnte durch einen schlechteren Wirkungsgrad der Konstant-Temperatur-Öl-Heizung, höhere Verluste der Gebäudehülle oder einer Abweichung des Ölverbrauchs entstanden sein. Die Endenergie  $Q_{E\dot{O}L}$  lässt sich mit Gleichung (4.22) berechnen [9].

$$Q_{E\dot{O}L} = \frac{Q_{\dot{O}L}}{\eta_K} \quad (4.22)$$

Zur Raumbeheizung und Warmwassererwärmung wird mit Gleichung (4.22) demnach eine Endenergie von  $98 \frac{MWh}{a}$  verwendet. Es ergibt sich für die Heizwärmebedarfsberechnung mithilfe des Ölverbrauchs die folgende Wärme-Energiewandlungskette (Abbildung 4.10).

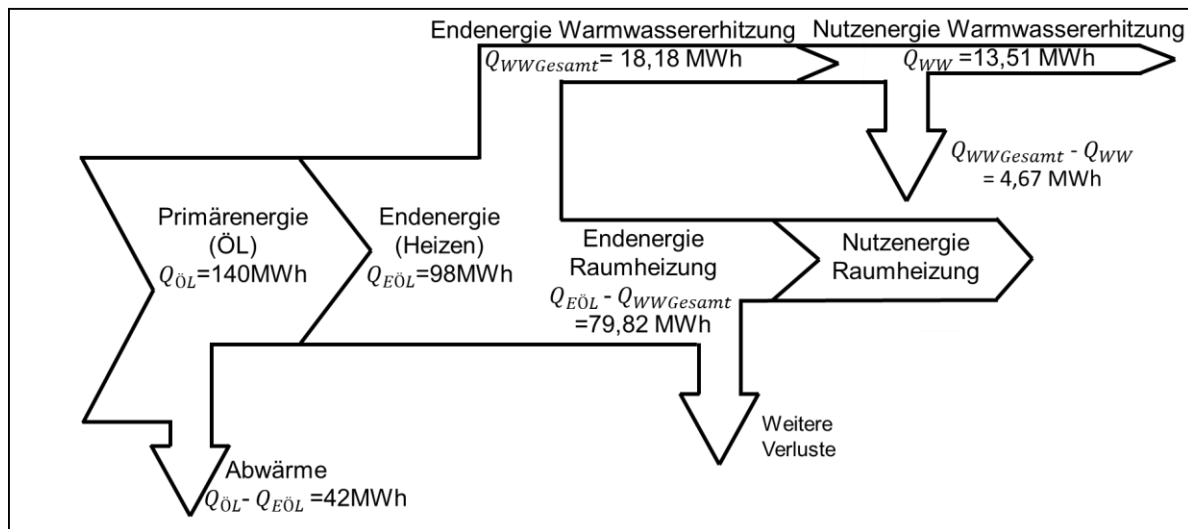


Abbildung 4.10: Schematische Wärme-Energiewandlungskette des Bestandsgebäudes

Die Primärenergie und die Endenergie sind aufgrund der bekannten Wirkungsgrade und den einher gehenden Verlusten einfach zu bestimmen. Die Nutzenergie jedoch lässt sich bei der Raumheizung nur unter weiterem Mess- und Berechnungsaufwand bestimmen, da die Verluste der Leitungen sowie der Heizelemente nicht bekannt sind. Deshalb sind die weiteren Verluste und die Nutzenergie der Raumheizung in der Abbildung 4.10 nicht definiert.

Der spezifische Endenergiebedarf des Gebäudes lässt sich mit Gleichung (4.23) berechnen.

$$Q_{Eb\ddot{O}L} = \frac{Q_{E\ddot{O}L}}{\text{beheizte Fläche}} \quad (4.23)$$

Eingesetzt in die Gleichung (4.23) ergibt sich der Endenergiebedarf  $Q_{Eb\ddot{O}L}$  zu  $251,28 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ . Dieser Bedarf ist in den aktuellen Energieausweisen als Klassifizierung *H* deklariert und somit als äußerst schlecht anzusehen. Für unzureichend oder ungedämmte Häuser mit veralteter Heiztechnik ist dieser hohe Wert jedoch realitätsnah [3].

#### 4.4 Eigenschaften des Nahwärmenetzes

Da sich die neue Kälteanlage und das Wärmenetz noch in der Planung befinden, werden in Absprache mit dem zuständigen Ingenieurbüro (OCFC) einige Annahmen getroffen. Derzeit sind zwei Standorte (St. 1 und St. 2) in der Planung. Nachfolgend ist eine Skizze zu den möglichen Standorten aufgeführt (Abbildung 4.11).

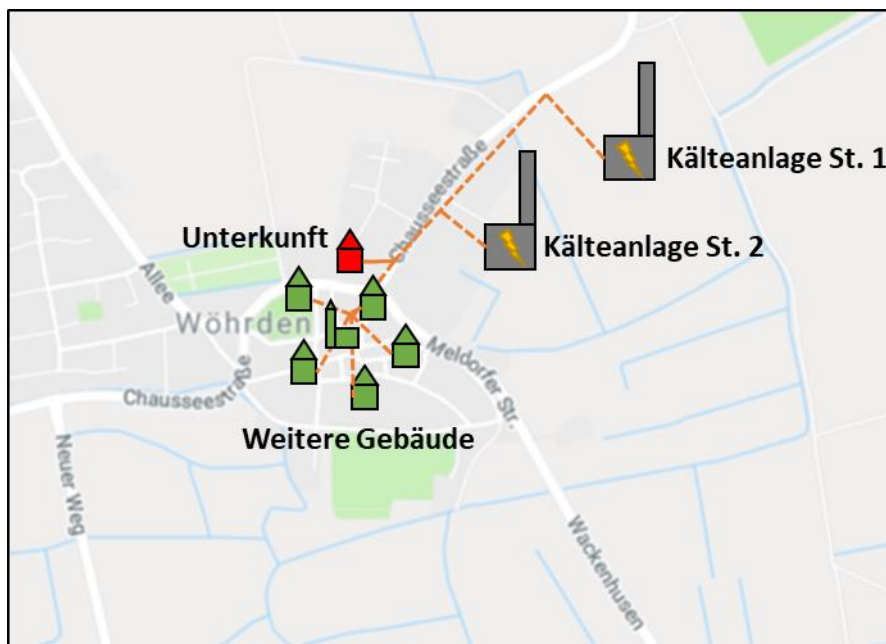


Abbildung 4.11: Skizze möglicher Kälteanlagenstandorte und Lage des Nahwärmenetzes

Die Standorte befinden sich etwa 300 m und 600 m entfernt vom Ortskern [11]. Von der Mitarbeiterunterkunft (rot markiert) sind es etwa 200 m und maximal 500 m bis zu den Kälteanlagen. In der Nähe des Ortskerns befinden sich noch weitere Bestandsgebäude (grün markiert), die an das Nahwärmenetz angeschlossen werden sollen.

Die Produktion der Frosterei wird für eineinhalb Monate von April bis Mitte Mai ausgesetzt. Somit ist in dieser Zeit keine Abwärme verfügbar [11]. Die restliche Zeit ist Abwärme aus den folgenden Quellen der Frosterei verfügbar (Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2: Abwärmequellen der Frosterei [11]

| Abwärmequelle                     | Temperatur [°C] | Leistung [kW] |
|-----------------------------------|-----------------|---------------|
| Ölkühlung Kältemaschine           | 50 bis 60       | 420           |
| Ölkühlung mit Wärmepumpenanhebung | 50 bis 70       | 504           |
| Enthitzung (Siehe Glossar)        | 30 bis 32       | 300           |
| Kühlwasser                        | 18              | 2000          |

Die Verwendung einer Strom-Wärmepumpe zur Temperaturerhöhung des Ölkühlers sollte aufgrund des zusätzlichen Stromverbrauchs und den daraus resultierenden Kosten vermieden werden.

Die realen Daten werden in Kapitel sieben für einen Ausblick genutzt. Aufgrund des variablen Betriebs und der schwankenden Außentemperaturen ist es äußerst schwierig die genauen Leistungen und die Temperaturen der Abwärme zu berechnen. Als Vorgabe von OCFC und zur Vereinfachung wird deshalb angenommen, dass die Nahwärmeleistung kontinuierlich 500 kW beträgt.

Weiterhin werden die folgenden drei möglichen Nahwärmemeterniveaus angenommen:

- Kontinuierlich 35°C
- 30 bis 50°C
- 30 bis 70°C (Mit Anhebung durch erzeugerseitige Wärmepumpe)

Die variablen Temperaturniveaus werden der Außentemperaturkurve von Wöhrden angeglichen. Es wird davon ausgegangen, dass die Abwärmemetemperatur erzeugerseitig durch verschiedene Maßnahmen so geregelt wird, dass eine typische Heizkurve entsteht.

Der Wärmeverbrauch eines Gebäudes ist stark von den Außentemperaturen abhängig. Bei verhältnismäßig kleinen Änderungen der Außentemperatur kann insbesondere bei ungedämmten Gebäuden ein starker Anstieg des Wärmebedarfs entstehen [3]. Um diesen Auswirkungen entgegen zu wirken, wurden Heizkurven entwickelt.

Heizkurven haben die Eigenschaft, dass sie einen nicht-linearen Verlauf aufzeigen und jeder Außentemperatur eine Vorlauftemperatur eines Gebäudes zugeordnet wird. In der folgenden Abbildung 4.12 sind typische Heizkennlinien aufgetragen.

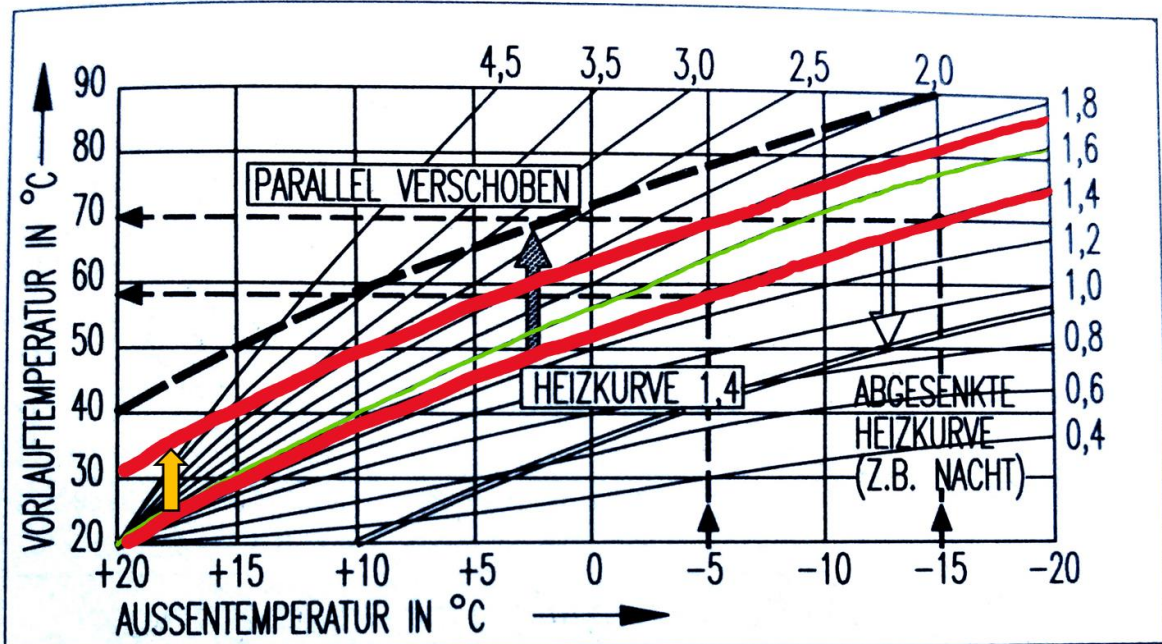


Abbildung 4.12: Typ. Heizkurven und Wahl einer Kennlinie - hohes Temperaturniveau [3]

In Abbildung 4.13 sind die über mehr als 20 Jahre gemittelten stündlichen Außentemperaturen von Wörden über ein Jahr aufgetragen.

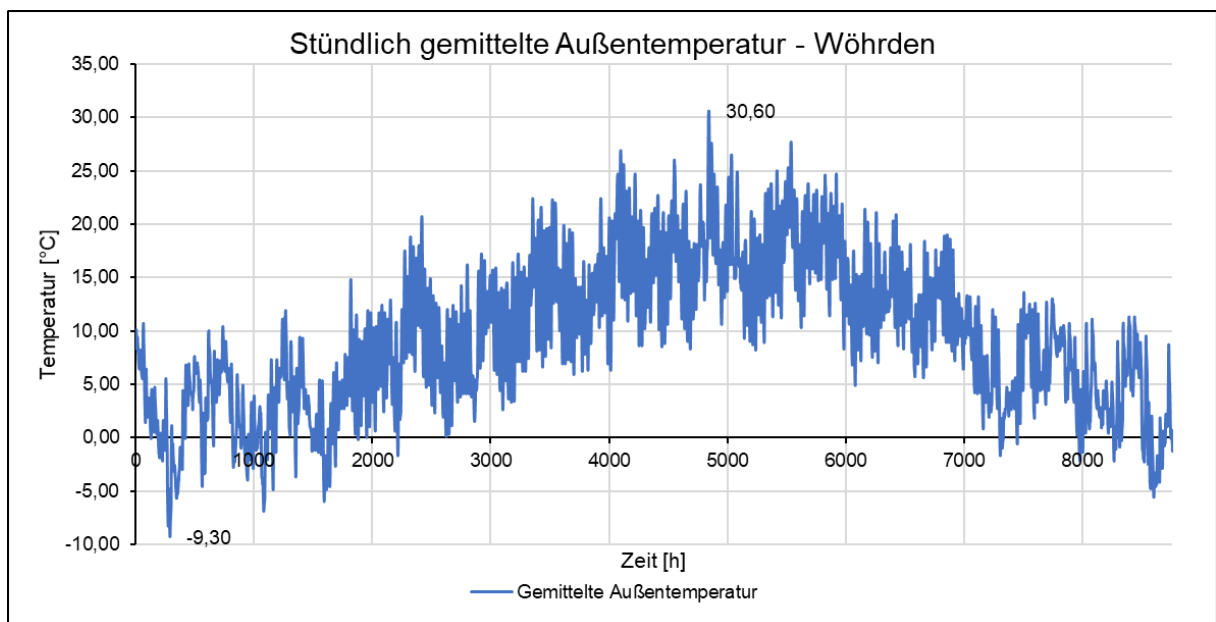


Abbildung 4.13: Gemittelte Außentemperaturen von Wörden (Daten aus Polysun [19])

Aus der Temperaturkurve geht hervor, dass die kälteste gemittelte Temperatur  $-9,3^{\circ}\text{C}$  und die wärmste  $30,6^{\circ}\text{C}$  beträgt.

In der Praxis werden Heizkurven einer Heizungsanlage nach Gefühl oder mithilfe von Testläufen des Heizungssystems ausgewählt. Anderenfalls ist werksseitig eine Standardkurve voreingestellt.

Da dies simulationsbedingt nicht möglich ist, wird eine Heizungskurve für das Temperaturniveau 30 bis 70°C nach den folgenden Aspekten ausgewählt:

- Bei ungedämmten Häusern sollte eine eher steilere Kurve gewählt werden [3]
- Die höchste Vorlauftemperatur von 70°C sollte in der Kennlinie etwa bei der kältesten auftretenden Außentemperatur liegen
- In Wörden beträgt die gemittelte niedrigste Außentemperatur -9,3°C

Daraus folgt, dass die grün markierte Heizkurve in Abbildung 4.12 am besten geeignet wäre. Da die niedrigste Nahwärmtemperatur und somit auch die Vorlauftemperatur bei 30°C liegt, muss jedoch die nächstkleinere Heizkurve (mit rot markiert) verwendet und parallel um 10°C (mit einem gelben Pfeil markiert) nach oben verschoben werden.

Aus der gewählten Heizkurve wurden 30 Datenpunkte (blau) zeichnerisch ermittelt und mit einer polynomischen Trendlinie 4. Grades (rote Linie) angenähert (Abbildung 4.14).

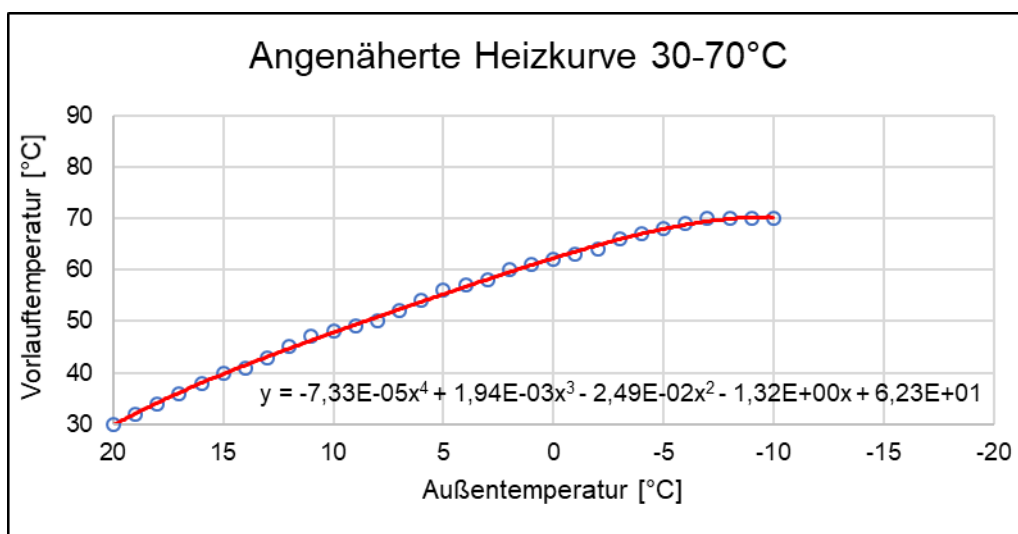


Abbildung 4.14: Mathematisch angenäherte Heizkurve - hohes Temperaturniveau

Die entstandene Formel wird für die weitere Berechnung der Vorlauftemperatur des hohen Temperaturniveaus verwendet.

Da das kleinere Temperaturniveau von 30 bis 50°C nicht mit der gewählten Heizkennlinie kompatibel ist, muss eine andere Kennlinie verwendet werden.

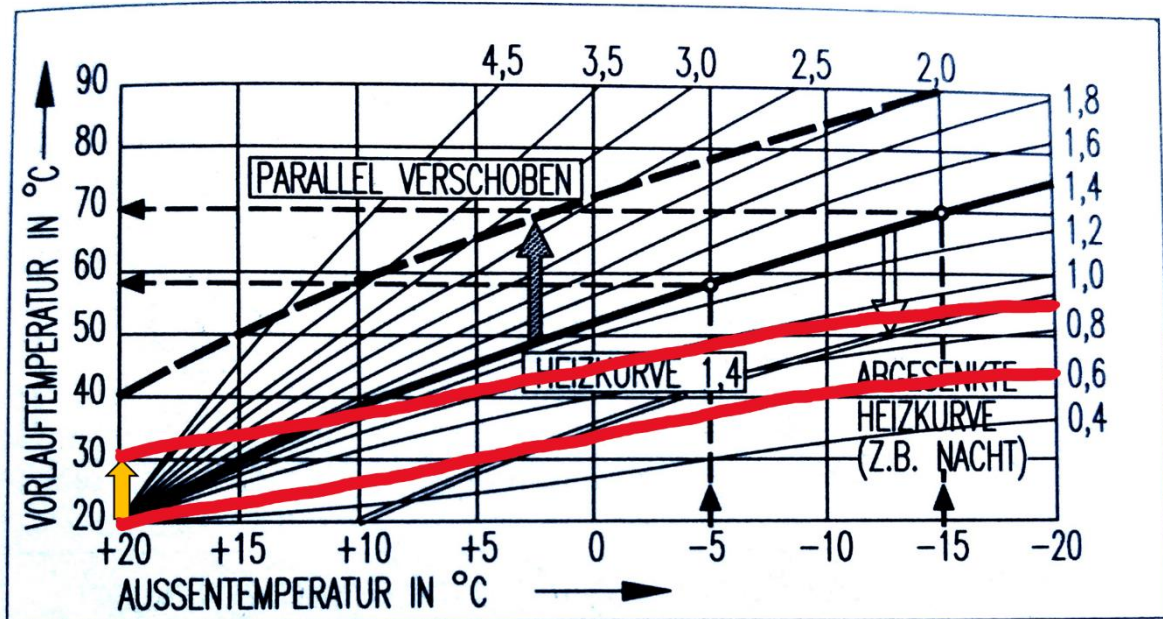


Abbildung 4.15: Wahl einer Heizkennlinie - mittleres Temperaturniveau [3]

In Abbildung 4.15 wurde die untere rote Heizkennlinie gewählt und um 10°C nach oben verschoben, da bei dieser die Vorlauftemperatur von 50°C bei etwa -9°C Außentemperatur eintritt.

Auch aus dieser gewählten Heizkurve wurden 30 Datenpunkte zeichnerisch ermittelt und mit einer polynomischen Trendlinie 4. Grades angenähert (Abbildung 4.16).

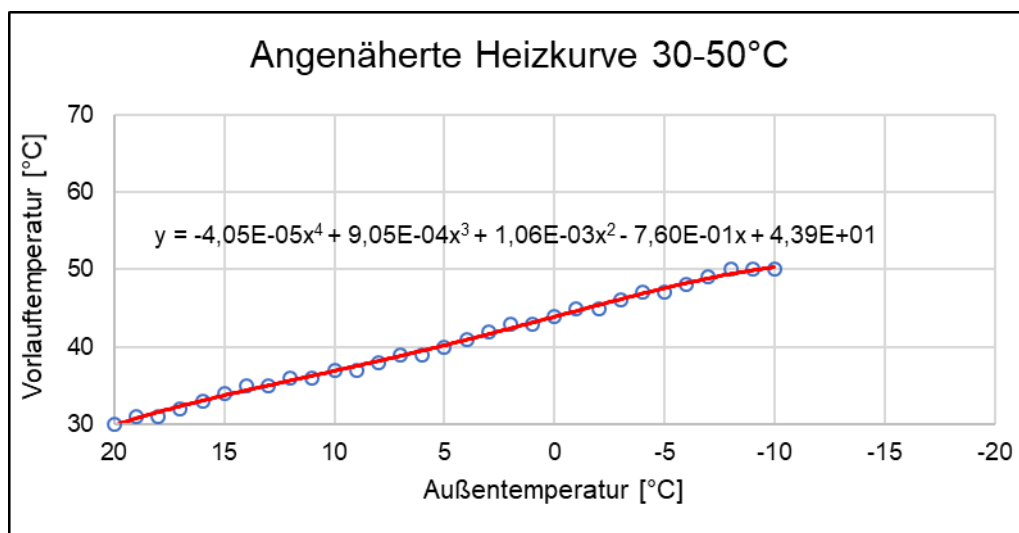


Abbildung 4.16: Mathematisch angenäherte Heizkurve - mittleres Temperaturniveau

Die entstandene Formel wird für die weitere Berechnung der Vorlauftemperatur des mittleren Temperaturniveaus verwendet.



Durch die Berechnung der Vorlauftemperatur mit den ermittelten Formeln zu jeder Stunde eines Jahres entsteht die folgende Grafik (Abbildung 4.17).

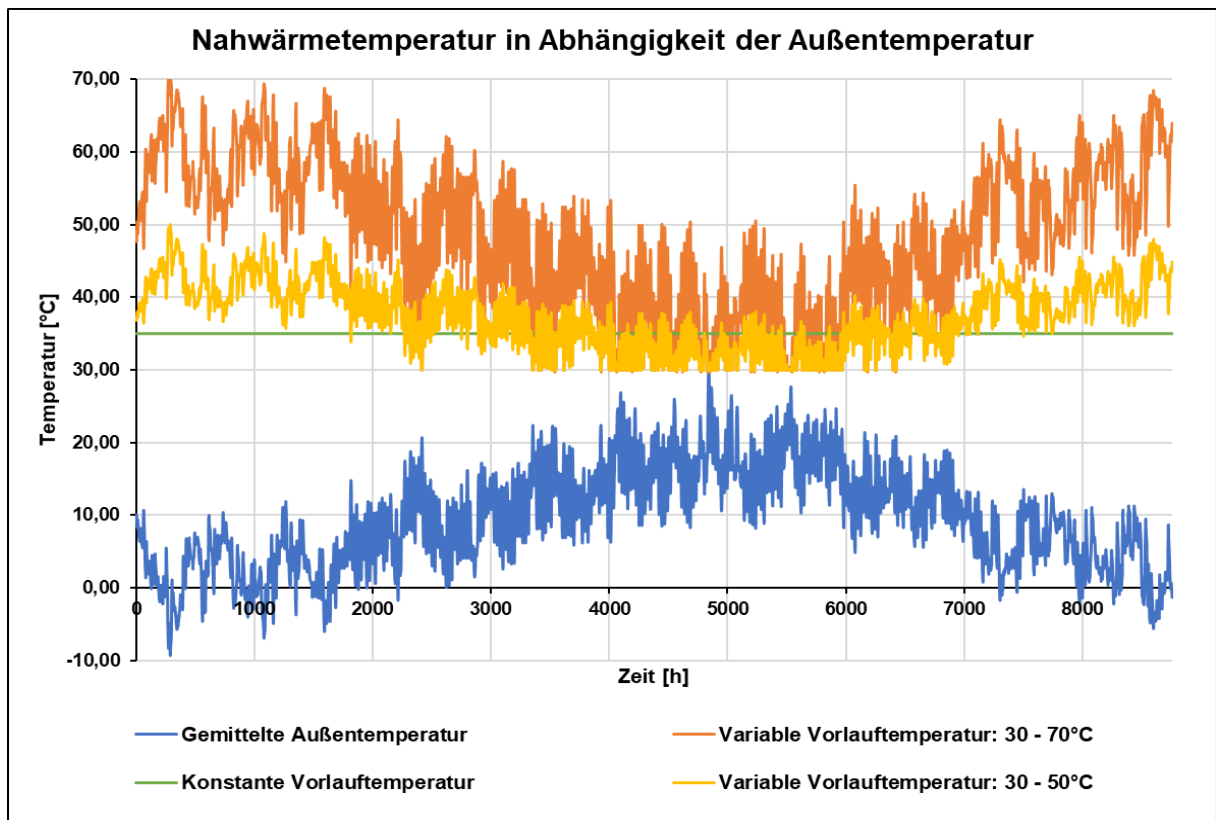


Abbildung 4.17: Nahwärmtemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur

In Abbildung 4.17 sind die Temperaturverläufe der unterschiedlichen Niveaus abgebildet. Da die Nahwärmtemperatur minimal 30°C beträgt, werden die Werte der angenäherten Funktion, die rechnerisch kleiner als 30°C sind, auf 30°C begrenzt.

Die ermittelten Heizkennlinien werden für die Nahwärmtemperatur des mittleren und höchsten Temperaturniveaus in der Simulation verwendet.

## 4.5 Prinzipieller Aufbau des Abwärme-Kreisprozesses

Nachfolgend wird das Zusammenspiel zwischen Erzeuger, Netz und Verbraucher in einer Skizze dargestellt (Abbildung 4.18).

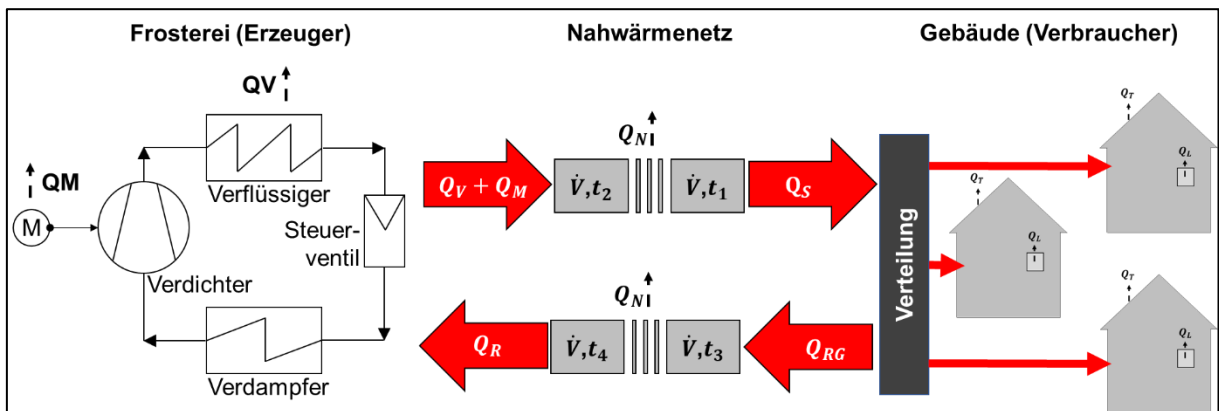


Abbildung 4.18: Skizze des prinzipiellen Abwärme-Kreisprozesses

Die vereinfachte Kältemaschine (in Abbildung 4.18 links) erzeugt durch den Antrieb des Verdichters mithilfe eines Motors ( $Q_M$ ) und der Verflüssigung des Kältemittels ( $Q_V$ ) Abwärme [4] [2] [20]. Für die Abwärmeleistungen  $Q_M$  und  $Q_V$  gibt es keine standardisierten Vorgaben, da diese bei jeder Kältemaschine anders ausfallen. Diese betragen nach Vorgabe 500kW.

Bei Betrachtung des niedrigsten Temperaturniveaus beträgt die Nahwärmtemperatur  $t_V$  am Gebäude 35 °C.

Der Volumenstrom kann durch die folgende Gleichung (4.24) berechnet werden [3].

$$\dot{V} = \frac{Q_M + Q_V}{c_p \cdot W \cdot \rho_W \cdot \Delta t} \quad (4.24)$$

Die Dichte  $\rho_W$  von Wasser beträgt bei Normbedingungen 1000  $\frac{kg}{m^3}$  oder auch 1  $\frac{kg}{l}$  [6].

Die Rücklauftemperatur  $t_3$  wird aufgrund der Rücklauftemperaturen der Heizelemente zu 25°C angenommen. Die Temperaturdifferenz  $\Delta t$  beträgt damit 10 K. Wenn die Werte in die Gleichung (4.24) eingesetzt werden, ergibt sich ein Volumenstrom  $\dot{V}$  von 11,962  $\frac{l}{s}$  was 43.062,2  $\frac{l}{h}$  entspricht.

Bei einem hohen Volumenstrom wie diesem wird ein breiter Rohrdurchmesser benötigt. Mithilfe der folgenden Abbildung 4.19 kann dieser bestimmt werden.

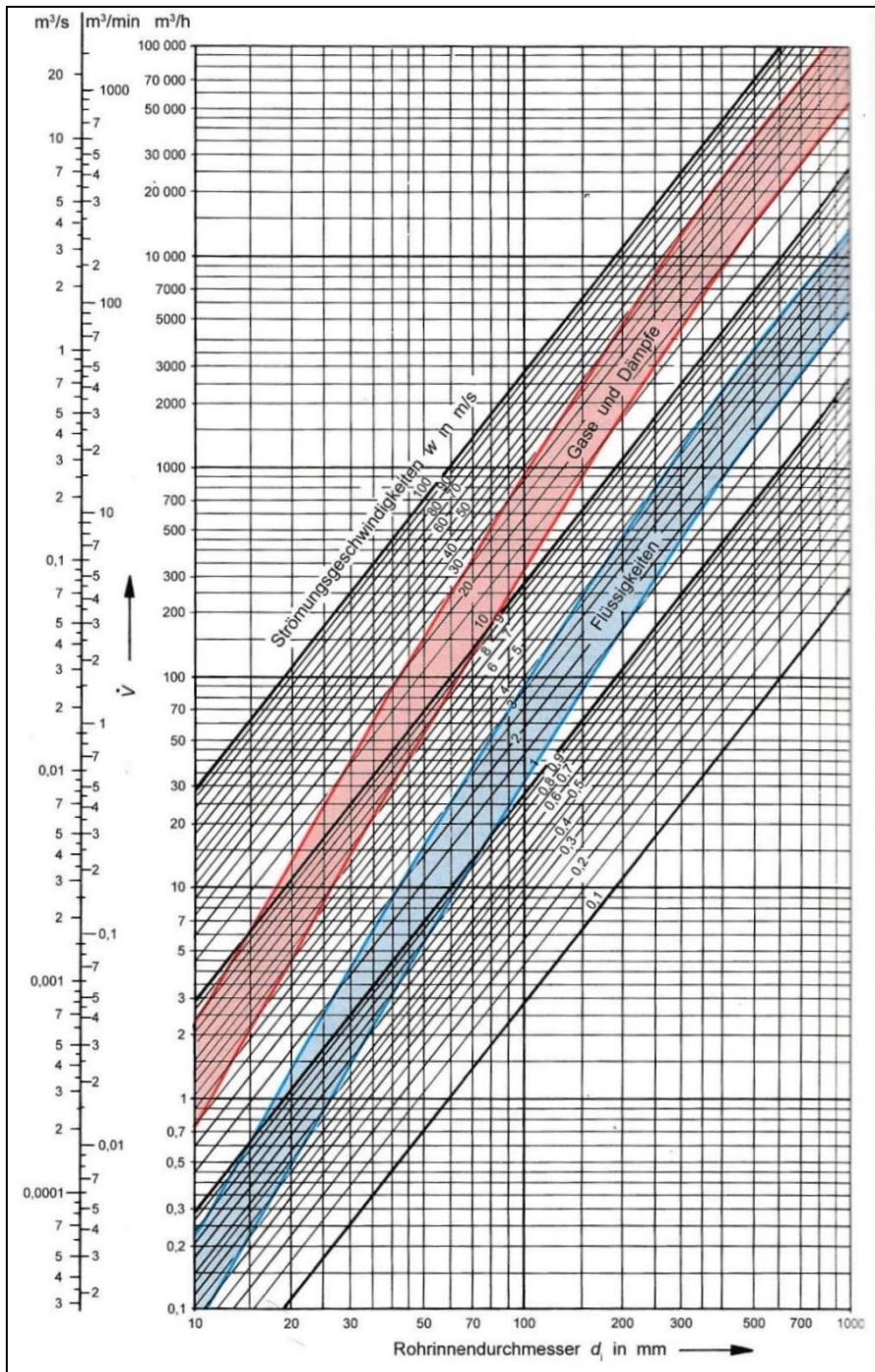


Abbildung 4.19: Ermittlung des Rohrinnendurchmessers mithilfe des Volumenstroms [21]

Aus der Abbildung 4.19 kann anhand des Volumenstroms der Rohrinnendurchmesser (Nennweite) ermittelt werden [21].

In der Abbildung 4.19 sind aufgrund unterschiedlicher Drücke die Flüssigkeiten (blau) und Gase (rot) dargestellt. Bei einem Volumenstrom von etwa  $50 \frac{m^3}{h}$  wurde der Rohrinne Durchmesser zu 125 mm (DN 125) bestimmt [21].

Das zu verwendende KMR-Rohr (Standard-Erdrohr) der Nennweite DN 125 muss mit einer Dämmung versehen werden, damit die Wärmeverluste an das Erdreich so gering wie möglich gehalten werden. In der folgenden Abbildung 4.20 sind Anhaltswerte für die wirtschaftliche Dämmdicke in Abhängigkeit des Rohraußendurchmessers aufgeführt [21].

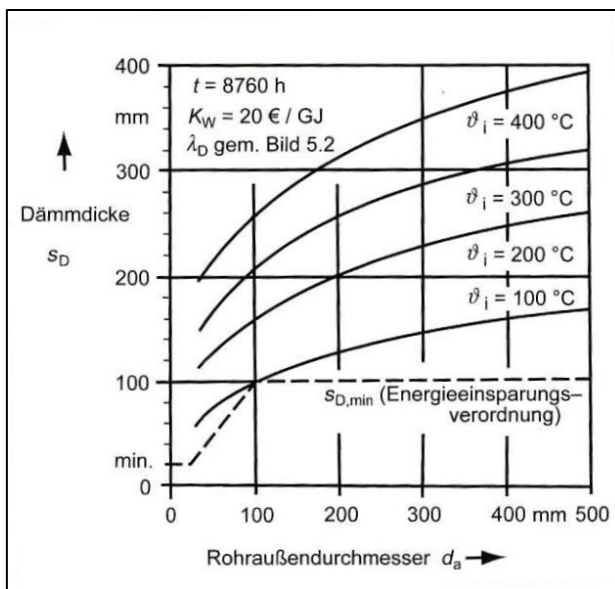


Abbildung 4.20: Wirtschaftliche Dämmdicke in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers [21]

Bei einem DN 125 Rohr beträgt der Außendurchmesser 139,7mm [21].

Mithilfe des Diagramms aus Abbildung 4.20 beträgt die wirtschaftliche Dämmdicke bei diesem Außendurchmesser etwa 110 mm.

Bei der Verwendung von Polystyrol-Extruderschäum mit Schäumhaut beträgt die Wärmeleitfähigkeit der Dämmung  $0,035 \frac{W}{m \cdot K}$  [21].

Die Temperatur fällt durch Strahlungsverluste an das Erdreich ab [7].

Diese lässt sich am anderen Ende der Leitung nach der folgenden Formel berechnen.

$$t_2 - t_{Erde} = \frac{t_1 - t_{Erde}}{e \left( \frac{\text{Leitungslänge}}{\dot{m} \cdot c_{p,W}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_D} \cdot \ln \left( \frac{d_{a,D}}{d_{i,D}} \right) + \frac{1}{2 \cdot \lambda_M} \cdot \ln \left( \frac{d_{a,M}}{d_{a,D}} \right) + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{ER}} \cdot \ln \left( \frac{d_{a,ER}}{d_{a,M}} \right) \right)} \quad (4.25)$$

Die Bodentemperatur  $t_{Erde}$  wurde für Wöhrden bereits mit  $10^\circ\text{C}$  angenommen.

Der Massenstrom  $\dot{m}$  ist definiert durch Gleichung (4.26) [4].

$$\dot{m} = \rho_W * \dot{V} \quad (4.26)$$

Eingesetzt ergibt sich ein Massenstrom  $\dot{m}$  von  $11,96 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ .

Die Wärmeleitfähigkeit der Dämmung des gewählten Rohrs  $\lambda_D$  beträgt  $0,035 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$  [7].

Der Außendurchmesser der Dämmung  $d_{a,D}$  beträgt  $0,3597 \text{ m}$ .

Der Außendurchmesser des Mediumrohrs  $d_{i,D}$  beträgt  $0,1397 \text{ m}$ .

Die Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffmantels  $\lambda_M$  beträgt  $0,43 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$  [21].

Der Außendurchmesser des Kunststoffmantels  $d_{a,M}$  beträgt  $0,3677 \text{ m}$  [21].

Die Wärmeleitfähigkeit des Erdreiches  $\lambda_{ER}$  beträgt  $1,2 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$  [7].

Der Außendurchmesser des ungestörten Erdreiches  $d_{a,ER}$  beträgt  $1,313 \text{ m}$  [7].

Da  $t_2$  bereits bekannt ist, wird die Gleichung (4.25) umgestellt um  $t_1$  zu erhalten.

$$t_1 - t_{Erde} = \frac{e \left( \frac{\text{Leitungslänge}}{\dot{m} * c_{p,W}} * \frac{\pi}{\frac{1}{2 * \lambda_D} * \ln\left(\frac{d_{a,D}}{d_{i,D}}\right) + \frac{1}{2 * \lambda_M} * \ln\left(\frac{d_{a,M}}{d_{a,D}}\right) + \frac{1}{2 * \lambda_{ER}} * \ln\left(\frac{d_{a,ER}}{d_{a,M}}\right)} \right)}{t_2 - t_{Erde}} \quad (4.27)$$

Wenn die Werte in Gleichung (4.27) eingesetzt werden, ergibt sich die Temperatur  $t_1$  von  $35,056^\circ\text{C}$ . Diese geringe Differenz von  $0,056^\circ\text{C}$  ist durch das geringe  $\Delta t$  zwischen Erdreich und Nahwärmeleitung sowie den hohen Volumenstrom zu begründen.

Weiterhin besteht ein Wärmeverlust pro Meter Rohrleitung. Dieser kann mit der folgenden Gleichung (4.28) berechnet werden [7].

$$\dot{q}_{V,Rohr} = \frac{\pi * (t_1 - t_{Erde})}{\frac{1}{2 * \lambda_D} * \ln\left(\frac{d_{a,D}}{d_{i,D}}\right) + \frac{1}{2 * \lambda_M} * \ln\left(\frac{d_{a,M}}{d_{a,D}}\right) + \frac{1}{2 * \lambda_{ER}} * \ln\left(\frac{d_{a,ER}}{d_{a,M}}\right)} \quad (4.28)$$

Eingesetzt in die Gleichung (4.28) ergibt sich ein Wärmeverlust  $\dot{q}_{V,Rohr}$  von  $5,59 \frac{\text{W}}{\text{m}}$ .

Um den Verlust der gesamten Nahwärmeleitung zu erhalten, muss der Wärmeverlust pro Meter mit der Länge der Nahwärmeleitung multipliziert werden.

$$Q_N = \text{Länge Nahwärmeleitung} * \dot{q}_{V,Rohr} \quad (4.29)$$

Eingesetzt in Gleichung (4.29) ergibt sich ein gesamter Wärmeverlust  $Q_N$  von  $2,9 \text{ kW}$ .

$$Q_S = Q_M + Q_V - Q_N \quad (4.30)$$

Mithilfe der Gleichung (4.30) kann die Wärmeleistung  $Q_S$ , die bei der Siedlung ankommt, mit  $497,2 \text{ kW}$  bestimmt werden.

Die Mitarbeiterunterkunft hat einen Wärmebedarf von etwa  $98 \text{ MWh}$  pro Jahr. Wenn die  $98 \text{ MWh}$  durch die Stunden in einem Jahr geteilt werden, beträgt die Leistung  $11,19 \text{ kW}$ . Da der Bedarf jedoch von den Außentemperaturen abhängig ist und stark schwankt, wird eine maximale Leistung von  $50 \text{ kW}$  angenommen.

Die von der Mitarbeiterunterkunft nicht benötigten  $447,2 \text{ kW}$  Wärmeleistung würde den anderen an das Nahwärmenetz angeschlossenen Gebäuden (der restlichen Siedlung) zur Verfügung stehen.

Die Soll-Rücklauftemperatur  $t_3$  beträgt am Gebäude  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Mithilfe der Gleichung (4.25) wurde berechnet, dass die Temperatur  $t_3$  auf dem Weg zurück zur Frosterei um  $0,033^\circ\text{C}$  sinkt. Damit beträgt die Temperatur  $t_4$  an der Frosterei  $24,967 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Je nach Verbrauch und Rücklauftemperaturen der anderen Gebäude verändern sich die Temperaturen  $t_3$  und  $t_4$  sowie die Leistungen  $Q_{RG}$  und  $Q_R$ .

Die Restwärme muss aufgrund der Solltemperatur des Kühlmediums und der Außentemperatur gegebenenfalls noch weiter abgekühlt werden, bevor es der Kältemaschine zugeführt werden kann.

## 5 Energieeffizienzmaßnahmen und Umrüstungsmöglichkeiten

In diesem Kapitel werden Maßnahmen zur Senkung des Wärmebedarfs aufgezeigt. Weiterhin wird auf die Umrüstung des Gebäudes zur effizienten Nahwärmenutzung eingegangen.

### 5.1 Mögliche Dämmmaßnahmen

Da die Mitarbeiterunterkunft eine unzureichende Dämmung besitzt, sollte über zusätzliche Dämmmaßnahmen nachgedacht werden.

Tabelle 5.3: Auswirkungen von unterschiedlichen Dämmmaßnahmen [17]

| Wärmeverlust<br>über | $A_i$<br>[m <sup>2</sup> ] | $U_{i\_alt}$<br>[W/m <sup>2</sup> *K] | $U_{i\_neu}$<br>[W/m <sup>2</sup> *K] | $G_T$<br>[K*d/a] | $\Delta Q$<br>[kWh] | Einsparung<br>[%] |
|----------------------|----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------|---------------------|-------------------|
| Fassade              | 242                        | 1,0                                   | 0,25                                  | 4179             | 18203,72            | 21,00             |
| Außenfenster         | 42                         | 3,0                                   | 1,0                                   | 4179             | 8424,86             | 9,72              |
| Außentür             | 6,2                        | 3,5                                   | 1,5                                   | 4179             | 1243,67             | 1,435             |
| Dach                 | 150                        | 1,4                                   | 0,2                                   | 4179             | 18053,28            | 20,83             |
| Kellerdecke          | 130                        | 1,0                                   | 0,3                                   | 4179             | 9126,94             | 10,53             |
| Summe =              |                            |                                       |                                       |                  | 55052,47            | 63,52             |

$\Delta Q$  : Transmissionswärmeeinsparungen

$$\Delta Q = Q_{Talt} - Q_{Tneu} \quad (5.1)$$

Tabelle 5.3 gibt Auskunft über die Einsparungspotentiale von unterschiedlichen Dämmmaßnahmen. Es geht hervor, dass eine ordnungsgemäße Dämmung der Mitarbeiterunterkunft eine Minderung des Heizwärmebedarfs um bis zu 63,5% erbringen kann. Wenn nur Teilmaßnahmen wie z.B. die Fenstererneuerung umgesetzt werden, kann es aufgrund von Feuchtigkeitsbildung an ungedämmten Außenteilen zu erheblichen Schimmelpilzproblemen führen [22].

Vor allem die Dämmung des Daches der Unterkunft würde im Verhältnis zum Heizwärmebedarf bis zu 20,8% des Bedarfs einsparen. In der folgenden Abbildung 21 ist das ungedämmte Dach zu sehen.



Abbildung 5.21: Ungedämmtes Dach der Unterkunft

In Abbildung 5.21 ist zu erkennen, dass das Dach keine Isolierung aufweist und eine Dämmung problemlos möglich sein sollte.



## 5.2 Richtige Wahl der Heizungselemente

Für die mögliche Umrüstung der Heizungsanlage ist es zwingend notwendig die richtigen Heizkörper und die passende Anzahl zu wählen. Die Verwendung von Heizkörpern mit unzureichender Heizleistung, zu hohen Vorlauftemperaturen oder die Wahl zu weniger Heizkörper, kann in kalten Jahreszeiten zu einer unzureichenden Beheizung der Räume führen und im schlimmsten Fall zur Unterkühlung der Gebäudehülle.

Nachfolgend sind in Tabelle 5.4 die möglichen Heizkörper mit den typischen Eigenschaften aus dem Heizelementkatalog von Polysun aufgelistet.

Tabelle 5.4: Heizkörper für die mögliche Umrüstung aus Polysun [19]

| Wärmeabgabekörper        | Vorlauftemperatur | Rücklauftemperatur | Leistung |
|--------------------------|-------------------|--------------------|----------|
| Fußbodenheizung          | 30°C bis 50°C     | 25°C bis 35°C      | 1000W    |
| Niedertemperaturradiator | 40°C bis 50°C     | 30°C bis 40°C      | 1000W    |

Da in dem verwendeten Simulationsprogramm keine Gebläseradiatoren verfügbar waren, wurden stattdessen Niedertemperaturradiatoren verwendet. Weiterhin sind keine Wandheizungen verfügbar.

Die oben aufgeführten Wärmeabgabekörper sind allesamt niedertemperaturfähig [1]. Dies ist vor allem bei Vorlauftemperaturen unter 50°C wichtig, da andernfalls die Wärmeabgabe nicht ausreichend wäre. Weiterhin bieten die niedrigen Vorlauftemperaturen Energieeinsparungen und ermöglichen die Nutzung von regenerativen Energien wie Solarthermie oder Erdwärme [1].

Die Vorlauftemperaturen der Heizelemente liegen zwischen 30 und 50°C. Damit ist es möglich, diese direkt am Nahwärmenetz zu betreiben. Da das Gebäude jedoch einen hohen Heizwärmebedarf aufweist, ist es ratsam über zusätzliche Komponenten zur Erhöhung der Quelltemperatur und damit der Vorlauftemperatur nachzudenken. Weiterhin werden für die Warmwasserbereitung aufgrund von möglicher Legionellenbildung tägliche Speichertemperaturen über 60°C benötigt, die sonst nur mithilfe eines zusätzlichen Elektroheizstabs erreicht werden können [1].

### **5.3 Wahl einer Anlage zur Temperaturerhöhung**

Die Verwendung eines Kessels zur Erhöhung der Nahwärmtemperatur wird nicht weiter betrachtet, da die Vorlauftemperaturen der Kessel in der Regel nicht niedrig genug sind [3] [9].

Das elektrisch betriebene Heizelement zur Unterstützung der Trinkwarmwasserversorgung wird vor allem bei einer niedrigen Nahwärmtemperatur und direkter Nutzung benötigt. Wenn möglich, sollte dieses Heizelement jedoch nur als Zusatz dienen und nicht als Hauptheizelement, da der Wirkungsgrad äußerst schlecht und das Resultat ein hoher Energieverbrauch ist.

Für das Bestandsgebäude eignet sich vor allem die Nutzung einer Luft-Wasser-Wärmepumpe, da diese Baumaßnahme einfach umsetzbar ist und keine großen Umbaumaßnahmen benötigt werden [1].

Die Kombination eines Förder- und Schluckbrunnens mit einer Wasser-Wasser-Wärmepumpe ist wirtschaftlich nicht tragbar, da die Bohrung der Brunnen und die Integration in das Bestandsgebäude äußerst aufwendig wäre und immense Kosten verursachen würde [1]. Da bei der Erdsonden- und Erdkollektorbauweise die gleiche Problematik herrscht, werden diese drei Bauweisen in der Simulation nicht weiter betrachtet.

Bei einem Neubau jedoch würde sich der Bau gegenüber einer Luft-Wärmepumpe bezahlt machen, da der Wirkungsgrad durch konstantere Temperaturen positiv auf den Stromverbrauch wirkt und eine größere Ausfallsicherheit herrscht [1].

Für die weitere Betrachtung werden die Fußboden- und Niedertemperaturradiator-Heizelemente sowie das elektrische Heizelement und die Luft-Wasser-Wärmepumpe gewählt.

## 6 Simulation und Bewertung

In diesem Kapitel wird das verwendete Simulationstool Polysun Simulation Software - Designer vorgestellt, Modelle und ihre Varianten werden benannt, simuliert und die Ergebnisse bewertet.

### 6.1 Vorstellung der Software Polysun

Da das Programm Polysun weitgehend unbekannt ist, wird es nachfolgend genauer beschrieben. Die Software der Schweizer Firma Vela Solaris hebt sich durch ihr breites Spektrum an möglichen Anlagenkomponenten im regenerativen sowie im konventionellen Energieerzeugungsbereich hervor [19]. Vor allem sind zahlreiche Komponenten zur Wärmegenerierung, Verteilung und Übergabe zu finden. In Abbildung 6.22 ist eine Übersicht über die wichtigsten Funktionsflächen zu finden.

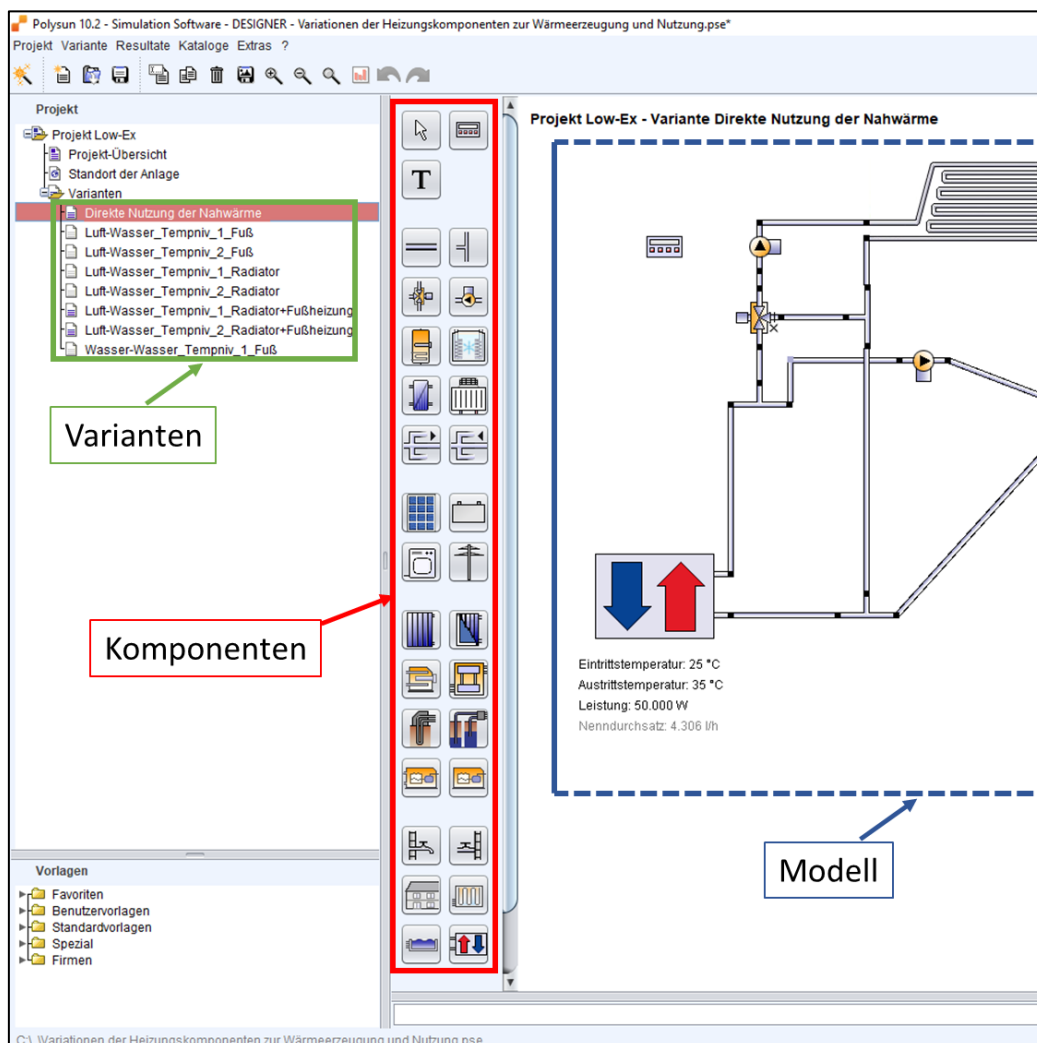


















Abbildung 6.22: Funktionsflächen von Polysun [19]

Alle erstellten Varianten enthalten ein Konstrukt aus mehreren vernetzten Komponenten. Jede dieser Varianten läuft für sich, jedoch können bei der Simulation zwei Varianten auf Basis eingestellter Parameter miteinander verglichen werden. Nachfolgend wird eine Übersicht über die vorhandenen Komponenten in Polysun gegeben.

Tabelle 6.5: Komponenten in Polysun [19]

|   |                                  |
|---|----------------------------------|
|    | <b>Rohr</b>                      |
|    | <b>T-Stück</b>                   |
|    | <b>Dreiwegventil</b>             |
|    | <b>Pumpe</b>                     |
|    | <b>Speicher</b>                  |
|    | <b>Eisspeicher</b>               |
|  | <b>Externer Wärmetauscher</b>    |
|  | <b>Luft-Wasser-Wärmetauscher</b> |
|  | <b>Ausflussvervielfacher</b>     |
|  | <b>Zuflussvervielfacher</b>      |
|  | <b>Heiz-/Kühlelement</b>         |
|  | <b>Warmwasserbedarf</b>          |
|  | <b>Kaltwasser</b>                |
|  | <b>Gebäude</b>                   |
|  | <b>Schwimmbad</b>                |
|  | <b>Steuerung</b>                 |

|   |                                |
|---|--------------------------------|
|    | <b>Kollektor</b>               |
|    | <b>PVT-Kollektor</b>           |
|    | <b>Kessel</b>                  |
|    | <b>S/W oder W/W Wärmepumpe</b> |
|    | <b>Erdwärmesonde</b>           |
|    | <b>Grundwassersonde</b>        |
|  | <b>Blockheizkraftwerk</b>      |
|  | <b>Generator</b>               |
|  | <b>Kältemaschine</b>           |
|  | <b>Kühlturm</b>                |
|  | <b>Energiesenke,-quelle</b>    |
|  | <b>Photovoltaik</b>            |
|  | <b>Batterie</b>                |
|  | <b>Elektrische Verbraucher</b> |
|  | <b>Stromnetz</b>               |

Mithilfe der in Tabelle 6.5 aufgeführten Komponenten können Anlagen von einem Gebäude bis hin zu einer ganzen Siedlung aufgebaut werden. Die einzige Grenze ist durch die endliche Modellfläche und die Leistung des verwendeten Simulations-Computers gegeben [19].

Wenn eine neue Komponente zu dem Modell hinzugefügt wurde, können die Eigenschaften angezeigt werden (Abbildung 6.23).

| @ | Name                                    | Wert                 | Einheit | Schema |
|---|---|----------------------|---------|--------|
|   | Beschreibung                            | 1                    |         |        |
|   | Modultyp                                | ▼ Konvektor/Radiator |         |        |
|   | Heiz-/Kühlelement                       | ▼ Fußbodenheizung    |         |        |
|   | - Katalog-Nr.                           | 13                   |         |        |
|   | - Soll-Vorlauftemperatur                | 30                   | °C      |        |
|   | - Soll-Rücklauftemperatur               | 25                   | °C      |        |
|   | - Leistung pro Heiz-/Kühlelement bei... | 1.000                | W       |        |
|   | - Fläche des Heiz-/Kühlelements         | 11                   | m²      |        |
|   | - Normvolumenstrom pro Heiz-/Kühl...    | 172                  | l/h     |        |
|   | - Volumen                               | 20                   | l       |        |
|   | Gebäudeauswahl                          | ▼ -                  |         |        |
|   | Anzahl Heiz-/Kühlelemente automati...   | ▼ Ja                 |         |        |

Abbildung 6.23: Eigenschaften einer Fußbodenheizung aus Polysun [19]

Wenn die Fußbodenheizung nicht die gewünschten Eigenschaften besitzt, können in einem Katalog alternative Heiz- und Kühlelemente ausgewählt werden. In Abbildung 6.24 ist ein Ausschnitt aus möglichen Heizelementen aufgeführt.

| Katalog-Nr. | Name               | Soll-Vorlauftemperatur [°C] | Soll-Rücklauftemperatur [°C] | Leistung pro Heiz-/Kühlelement bei Normbedingungen [W] |
|-------------|--------------------|-----------------------------|------------------------------|--|
| 13          | Fußbodenheizung    | 30                          | 25                           | 1.000  |
| 21          | Fußbodenheizung    | 30                          | 27                           | 1.000  |
| 24          | BDH/BSW Referen... | 35                          | 28                           | 1.000  |
| 9           | Fußbodenheizung    | 35                          | 25                           | 1.000  |
| 19          | Fußbodenheizung    | 35                          | 30                           | 1.000  |
| 20          | Fußbodenheizung    | 35                          | 30                           | 1.000  |
| 22          | Fußbodenheizung    | 35                          | 28                           | 1.000  |
| 3           | ★ Fußbodenheiz...  | 40                          | 35                           | 1.000  |
| 23          | Radiator           | 40                          | 30                           | 1.000  |
| 8           | Fußbodenheizung    | 45                          | 35                           | 1.000  |
| 16          | Radiator           | 45                          | 35                           | 1.000  |
| 4           | Fußbodenheizung... | 45                          | 35                           | 7.000  |
| 5           | Fußbodenheizung... | 45                          | 35                           | 10.000   |
| 6           | Fußbodenheizung... | 45                          | 35                           | 15.000   |
| 7           | Fußbodenheizung... | 45                          | 35                           | 18.000   |
| 12          | Fußbodenheizung    | 50                          | 40                           | 1.000  |
| 14          | Radiator           | 50                          | 40                           | 1.000  |
| 17          | Radiator           | 55                          | 45                           | 1.000  |
| 2           | ★ Konvektor        | 60                          | 50                           | 1.000  |
| 10          | Radiator           | 60                          | 50                           | 1.000  |
| 11          | Radiator           | 60                          | 40                           | 1.000  |
| 15          | Radiator           | 60                          | 45                           | 1.000  |
| 1           | ★ Radiator         | 65                          | 55                           | 1.000  |
| 18          | Radiator           | 70                          | 60                           | 1.000  |

Abbildung 6.24: Ausschnitt der Heiz- und Kühlelement-Liste von Polysun [19]

Wenn auch hier kein passendes Element auffindbar ist, können die meisten Eigenschaften von einem vorher kopierten Element individuell angepasst werden.

Die Logik und Regelung der Schaltung wird von Steuerungsbausteinen übernommen. Beim Platzieren einer neuen Steuerung öffnet sich automatisch ein Fenster zur Auswahl der spezifischen Steuerung (Abbildung 6.25).

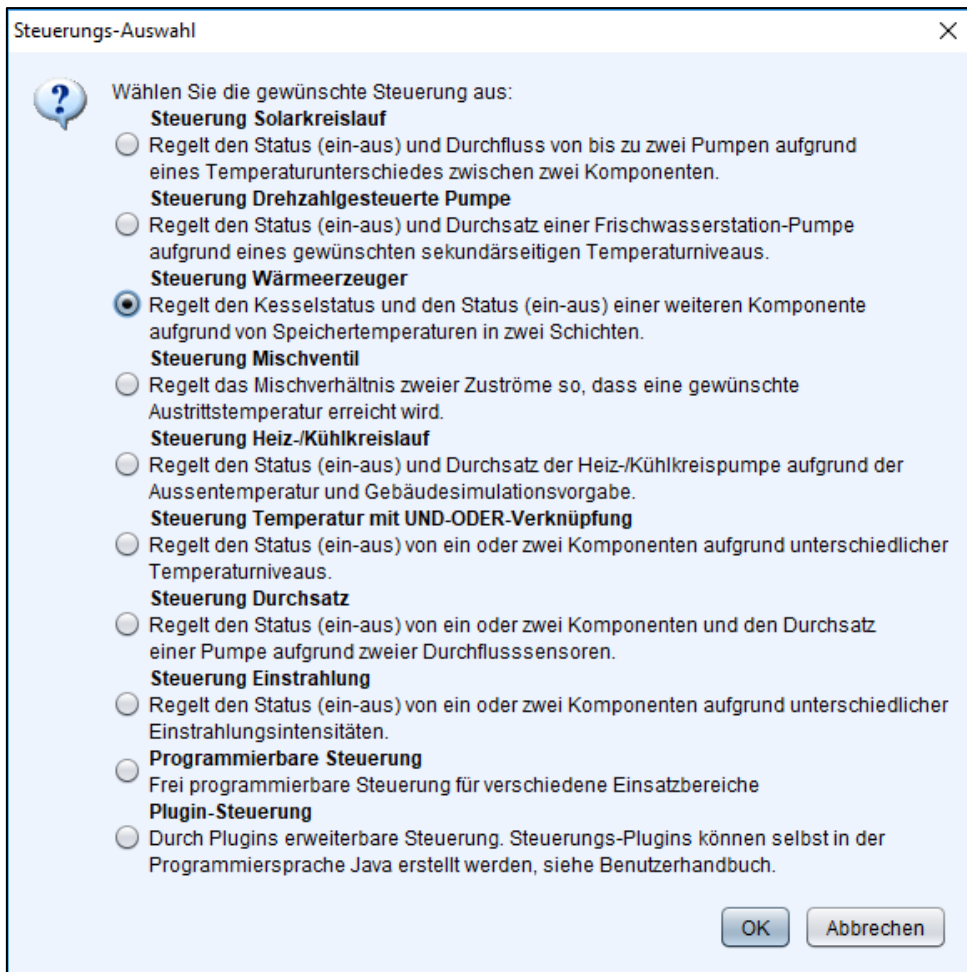


Abbildung 6.25: Steuerungsauswahl von Polysun [19]

Mit diesen Steuerungen können Wärmeerzeuger, Pumpen, Ventile und weitere Komponenten mithilfe von definierten Ein- und Ausgängen sowie einer Logik gesteuert werden.

## 6.2 Modellwahl

Mithilfe des Simulationsprogramms werden nachfolgend die beiden Modelle „Direkte Nutzung der Nahwärme“ und „Luft-Wasser-Wärmepumpe“ vorgestellt, die in ihren unterschiedlichen Varianten (3) (9) mit der Wahl von jeweils anderen Parametern simuliert werden. Die entstandenen Experimente werden anschließend miteinander verglichen und bewertet.

Die Parameter der zwölf Varianten wurden durch Testläufe ermittelt, damit ein möglichst geringer Stromverbrauch und somit ein hoher Gesamtwirkungsgrad realisiert werden kann. Dabei wurden die Parameter so verändert, dass die Änderung der vorher eingestellten Parameter berücksichtigt wurde. Wenn z.B. das Volumen des Trinkwarmwasserspeicher geändert wurde, wurde der Durchsatz der Pumpen und gegebenenfalls die Logik für den Speicher angepasst.

Das Gebäude wurde bei allen Varianten mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von  $1,18 \frac{W}{m^2 \cdot K}$  gewählt. Der Heizwärmebedarf des Gebäudes beträgt in der Simulation je nach Variante minimal 98,5 MWh und maximal 100 MWh. Die Abweichung von bis zu 2 MWh zu dem berechneten Heizwärmebedarf wird vernachlässigt.

Da die Trinkwarmwassertemperatur durch Leitungsverluste leicht sinken würde, werden anstatt 40°C (durchschnittliche Duschtemperatur) in der Simulation 45°C für die Warmwassertemperatur angenommen. Damit beträgt der Energiebedarf für die Warmwasserbereitung in der Simulation bei allen Varianten 14,91 MWh. Dies ist ein praxisnaher Wert, da der Wirkungsgrad des Konstant-Öl-Kessels in der Simulation nicht beachtet wurde.

Der Trinkwarmwasserspeicher wird durch die Steuerungen auf eine maximale Temperatur von 62°C beschränkt. Programmbedingt können diesbezüglich leichte Erhöhungen der Speichertemperatur auftreten. Weiterhin wird die oberste Schicht des Trinkwarmwasserspeicher übers Jahr mehr als 3000-mal über 60°C erhitzt. Es kann damit davon ausgegangen werden, dass die Temperatur des Speichers täglich einmal über 60°C beträgt. Somit kann eine Legionellen-Bildung ausgeschlossen werden.

Die benötigte Heizelementanzahl wurde automatisch vom Simulationsprogramm ermittelt und gegebenenfalls manuell auf die vorhandene Fläche begrenzt.

Die bei Polysun verwendeten Wetterdaten sind von dem Dienstleistungsunternehmen Meteororm und können sich über einen Zeitraum von bis zu 30 Jahren erstrecken [19].

### 6.2.1 Direkte Nutzung der Nahwärme

Die einfachste Nutzung der Nahwärme stellt die direkte Nutzung dar. Dabei muss beachtet werden, dass vor allem bei Temperaturen unter 60°C die Trinkwassererhitzung nicht ausreichend ist, um die Legionellenbildung zu unterbinden [1]. Um die Temperatur im Trinkwarmwasserspeicher über den nötigen Schwellwert zu heben wird ein Elektroheizstab (im Modell als Blitz dargestellt) verwendet. Als Heizelement für die direkte Nutzung der Nahwärme werden aufgrund der niedrigen Vorlauftemperaturen nur Fußbodenheizungen (F) verwendet.

Das Modell der direkten Nahwärmenutzung ist in Abbildung 6.26 aufgeführt.

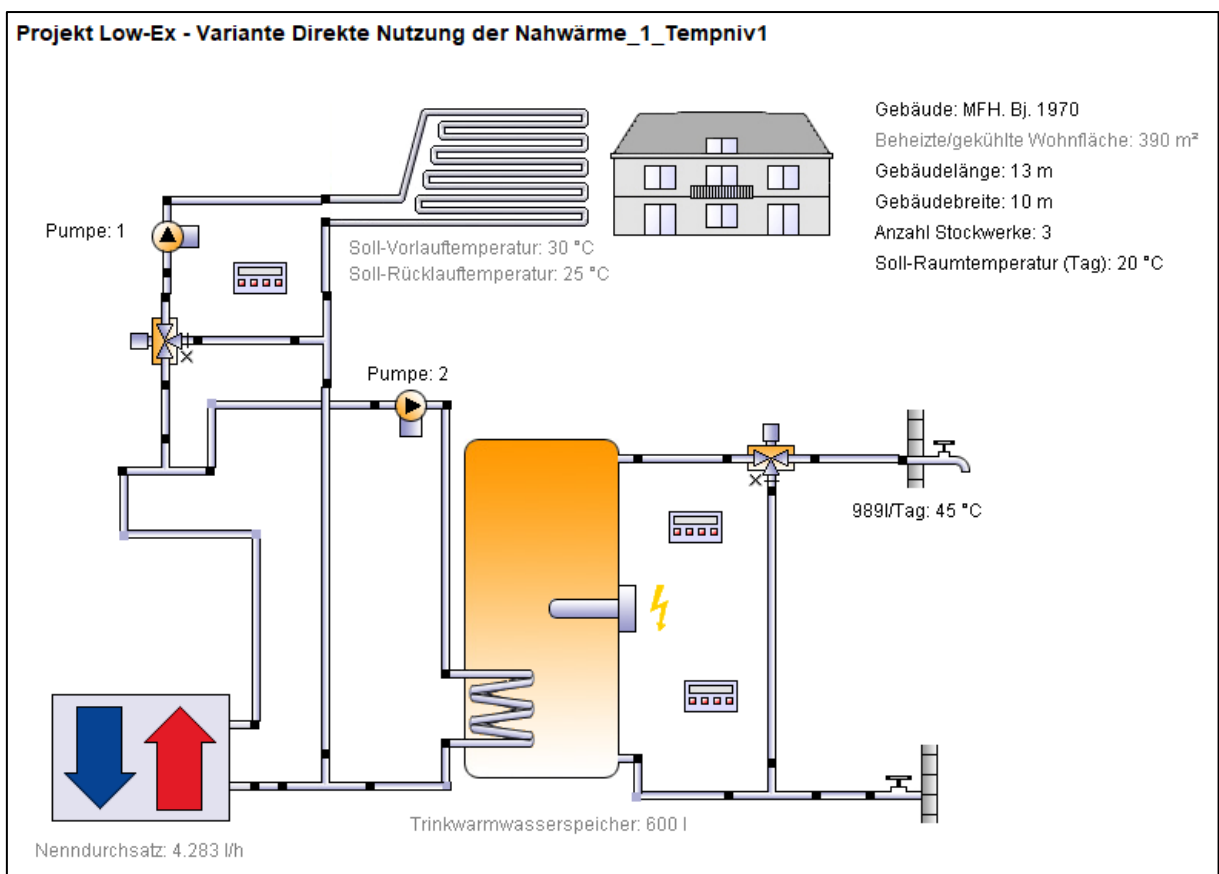


Abbildung 6.26: Modell der Nahwärme Direktnutzung



Die folgende Tabelle 6.6 enthält die drei verschiedenen Varianten mit den jeweils am besten geeigneten Parametern.

Tabelle 6.6: Varianten der direkten Nahwärme-Nutzung

| Variante Direkt:                      | 1           | 2         | 3         |
|---------------------------------------|-------------|-----------|-----------|
| Abwärmtemperatur [°C]                 | 35 konstant | 30 bis 50 | 30 bis 70 |
| Nenndurchsatz Nahwärme [l/h]          | 4300        | 2461      | 1566      |
| Bereitgestellte Leistung [kW]         | 50          |           |           |
| Verwendetes Heizelement               | F           | F         | F         |
| Vorlauftemperatur [°C]                | 30          | 30        | 30        |
| Rücklauftemperatur [°C]               | 25          | 25        | 25        |
| Leistung/Heizelement [W]              | 1000        | 1000      | 1000      |
| Fläche Heizelement [m <sup>2</sup> ]  | 11          | 11        | 11        |
| Heizelementanzahl                     | 35          | 35        | 35        |
| Durchsatz Pumpe_1 [m <sup>3</sup> /h] | 6           | 6         | 6         |
| Durchsatz Pumpe_2 [m <sup>3</sup> /h] | 1,5         | 1,5       | 1,5       |
| Volumen Speicher [m <sup>3</sup> ]    | 0,6         | 0,5       | 0,6       |

## 6.2.2 Luft-Wasser-Wärmepumpe

Um den Energieverbrauch zu senken, wird in dem nachfolgenden Modell eine Luft-Wasser-Wärmepumpe zur Erhöhung der Trinkwarmwasservorlauftemperatur in das System integriert. Da die Vorlauftemperaturen durch die Wärmepumpe höher sind, werden bei diesem Modell als Heizelemente Fußbodenheizungen und Niedertemperaturradiatoren verwendet.

Das Modell der Luft-Wasser-Wärmepumpe ist in Abbildung 6.27 aufgeführt.

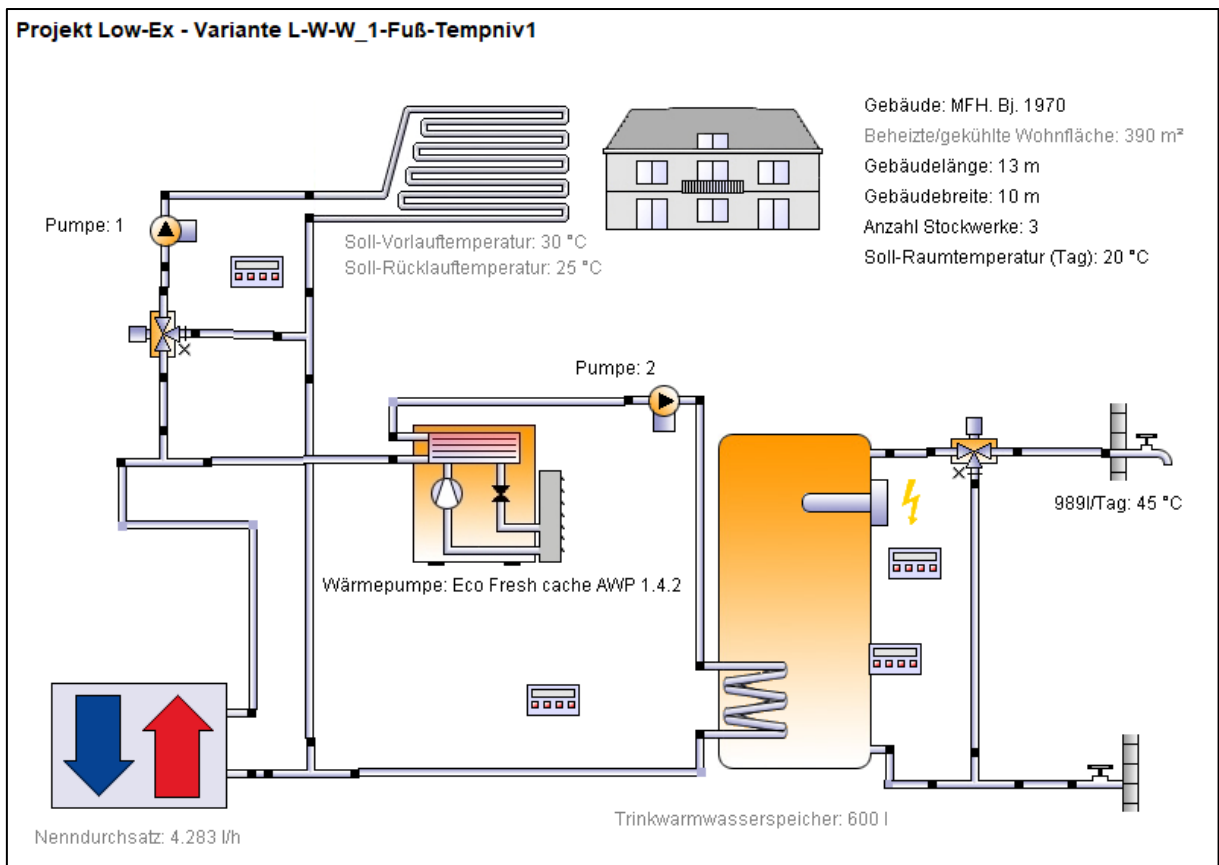


Abbildung 6.27: Modell der Nahwärmenutzung mit Luft-Wasser-Wärmepumpe

Durch die zusätzliche Verwendung einer Luft-Wasser-Wärmepumpe wird das elektrisch betriebene Heizelement entlastet und der Energieverbrauch sollte sinken.

Bei diesem Modell ist es auch möglich, dass die Fußbodenheizung (F) mit Niedertemperaturradiatoren (R) kombiniert (FR) wird.

In Abbildung 6.28 ist ein Ausschnitt einer Variante mit Fußboden- und Radiatorheizelement aufgeführt

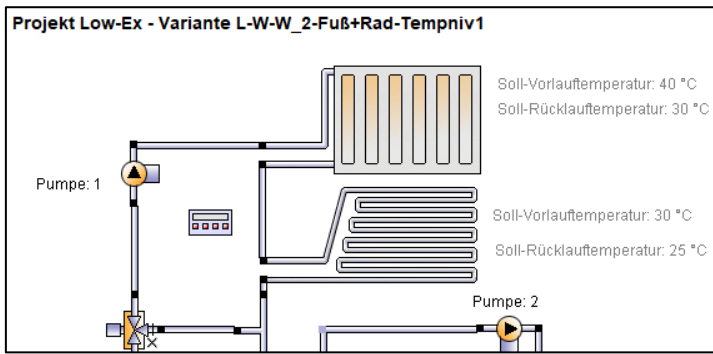


Abbildung 6.28: Modell der Nahwärmenutzung mit L-W, Radiator und Fußbodenheizung

In Tabelle 6.7 sind die neun verschiedenen Varianten der Luft-Wasser-Wärmepumpe (L-W) mit den jeweils am besten geeigneten Parametern aufgeführt.

Tabelle 6.7: Varianten der Nahwärme-Nutzung mithilfe einer Luft-Wasser-Wärmepumpe

| Variante <b>L-W:</b>          | 1           | 2   | 3   | 4         | 5   | 6   | 7         | 8   | 9   |
|-------------------------------|-------------|-----|-----|-----------|-----|-----|-----------|-----|-----|
| Abwärmtemperatur [°C]         | 35 konstant |     |     | 30 bis 50 |     |     | 30 bis 70 |     |     |
| Nenndurchsatz Nahwärme [l/h]  | 4306        |     |     | 2461      |     |     | 1566      |     |     |
| Bereitgestellte Leistung [kW] | 50          |     |     |           |     |     |           |     |     |
| Verwendetes Heizelement       | F           | FR  | R   | F         | FR  | R   | F         | FR  | R   |
| Vorlauftemperatur Fuß. [°C]   | 30          |     |     |           |     |     |           |     |     |
| Rücklauftemperatur Fuß. [°C]  | 25          |     |     |           |     |     |           |     |     |
| Leistung Fuß. [W]             | 1000        |     |     |           |     |     |           |     |     |
| Fläche Fuß. [m²]              | 11          |     |     |           |     |     |           |     |     |
| Fuß. Anzahl                   | 35          | 35  | 0   | 35        | 35  | 0   | 35        | 35  | 0   |
| Vorlauftemperatur Rad. [°C]   | 40          |     |     |           |     |     |           |     |     |
| Rücklauftemperatur Rad. [°C]  | 30          |     |     |           |     |     |           |     |     |
| Leistung Rad. [W]             | 1000        |     |     |           |     |     |           |     |     |
| Fläche Rad. [m²]              | 2,5         |     |     |           |     |     |           |     |     |
| Rad. Anzahl                   | 0           | 30  | 50  | 0         | 30  | 30  | 0         | 30  | 30  |
| Leistung Wärmepumpe [kW]      | 2,8         | 2,8 | 2,8 | 5         | 5   | 5   | 1,3       | 1,3 | 1,3 |
| Durchsatz Wärmepumpe [m³/h]   | 0,5         | 0,5 | 0,5 | 1         | 1   | 1   | 0,4       | 0,4 | 0,4 |
| Durchsatz Pumpe_1 [m³/h]      | 6           | 12  | 7   | 6         | 12  | 7   | 6         | 12  | 7   |
| Durchsatz Pumpe_2 [m³/h]      | 0,6         | 0,6 | 0,6 | 0,7       | 0,7 | 0,7 | 0,6       | 0,6 | 0,6 |
| Volumen Speicher [m³]         | 0,6         | 0,6 | 0,8 | 0,5       | 0,5 | 0,5 | 0,2       | 0,2 | 0,2 |

### 6.3 Simulation der Modelle

Die beiden Modelle „Direkte Nutzung der Nahwärme“ und „Luft-Wasser-Wärmepumpe“ werden in all ihren zwölf Varianten simuliert. Die Simulationsergebnisse von Polysun werden grafisch aufgearbeitet und nachfolgend dargestellt. Die Ordinatenachsen der nachfolgenden Grafiken werden zur besseren Darstellung angepasst.

#### 6.3.1 Direkte Nahwärmenutzung

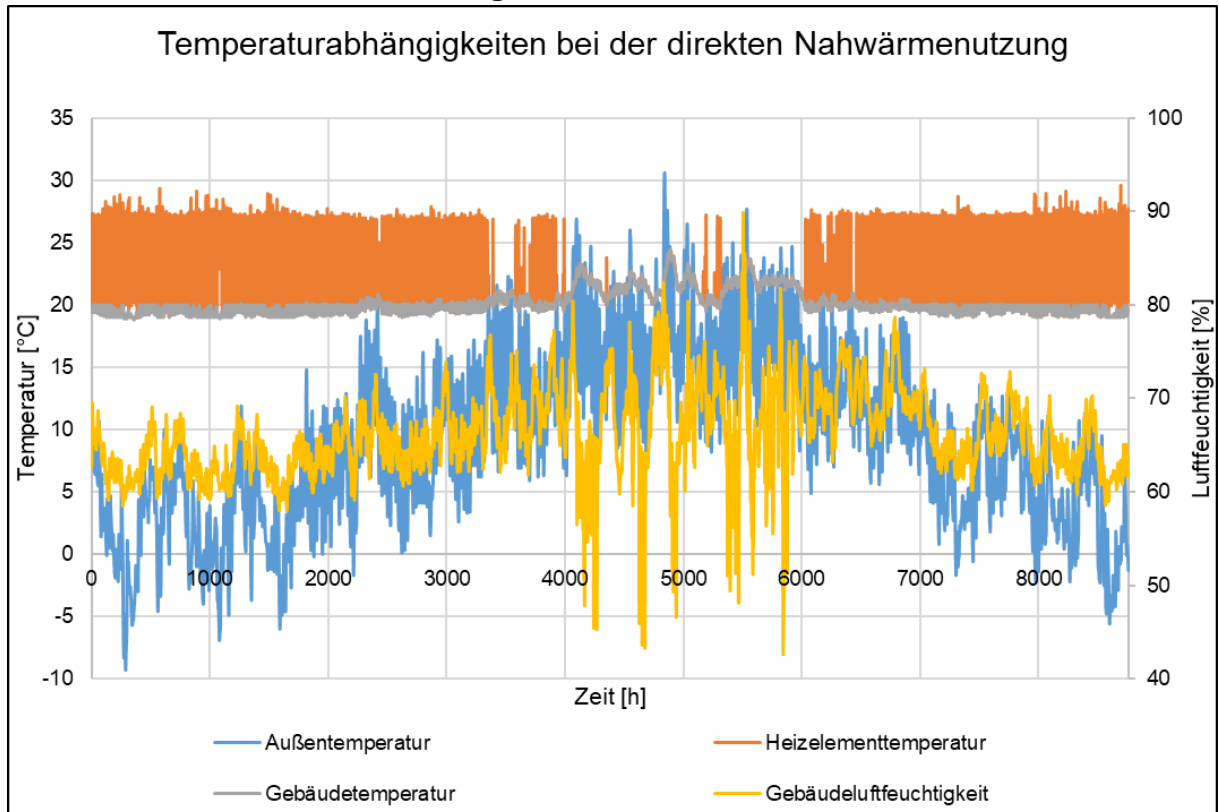


Abbildung 6.29: Temperaturabhängigkeiten bei direkter Nahwärmenutzung

In Abbildung 6.29 sind die Gebäude- und der Heizelementtemperaturen (auf der linken Ordinatenachse) sowie die Luftfeuchtigkeit (auf der rechten Ordinatenachse) im Zusammenhang mit der Außentemperatur aufgetragen.

Die Gebäudetemperatur ist bis auf einige Sommertage weitgehend konstant.

Die Heizelementtemperatur schwankt aufgrund des variablen Heizwärmebedarfs zwischen 20 und 28°C. Im Sommer werden die Heizelemente bei Temperaturen über der Soll-Innentemperatur abgeschaltet.

Aufgrund der Sollvorlauftemperatur für die Heizelemente und das Gebäude verändern sich die Graphen durch Wahl eines anderen Temperaturniveaus nur geringfügig und die Abbildung 6.29 ist bei allen drei Varianten sehr ähnlich.

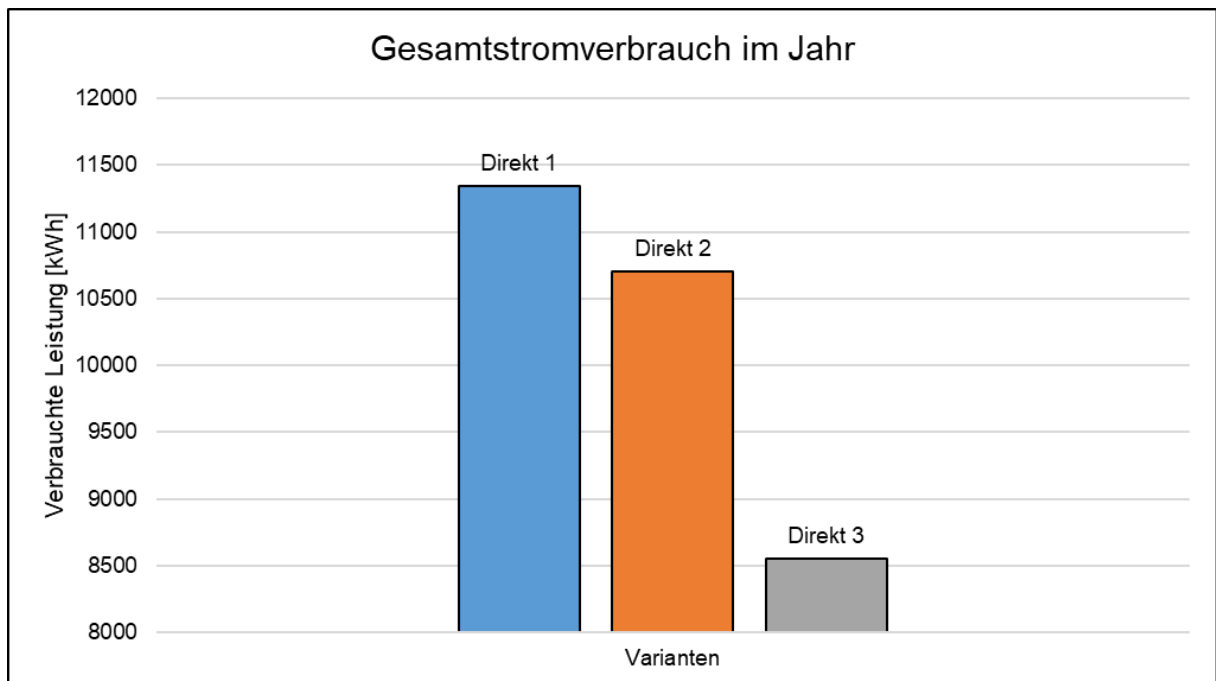


Abbildung 6.30: Direkte Nahwärmenutzung Vergleich des Gesamtstromverbrauchs

In Abbildung 6.30 ist der Gesamtstromverbrauch der drei verschiedenen Varianten der direkten Nahwärmenutzung aufgetragen. Der verbrauchte Strom wird durch die Nutzung der unterschiedlichen Temperaturniveaus beeinflusst. Bei einer Nahwärme von konstanten 35°C (*Direkt 1*) ist die benötigte Energie mit 11.346 kWh am größten. Im Gegensatz dazu ist bei der Wahl des größten Temperaturniveaus (*Direkt 3*) durch die mitunter hohen Vorlauftemperaturen von 70°C eine weitere Erhitzung häufig überflüssig und der Stromverbrauch sinkt auf 8551 kWh.

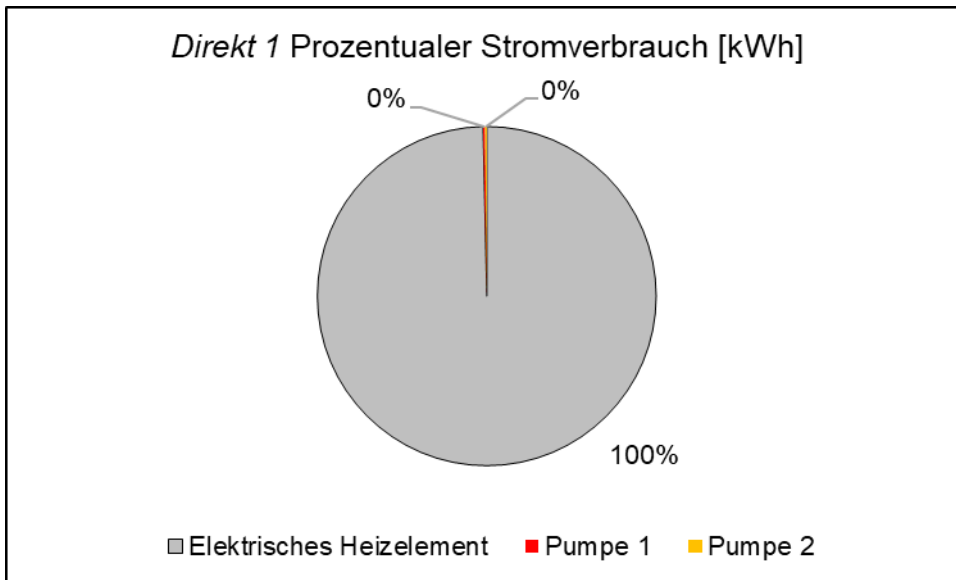


Abbildung 6.31: Stromverbrauch von Direkt 1 im Detail

In Abbildung 6.31 ist der prozentuale Stromverbrauch der Direkten Nahwärmenutzung Variante 1 dargestellt. Das elektrische Heizelement nimmt mehr als 99% des Verbrauchs ein. Bei den beiden anderen Varianten nimmt dieser ab, jedoch überwiegt auch hier der Anteil des elektrischen Heizelements den der Pumpen bei weitem.

### 6.3.2 Nutzung einer zusätzlichen Luft-Wasser-Wärmepumpe

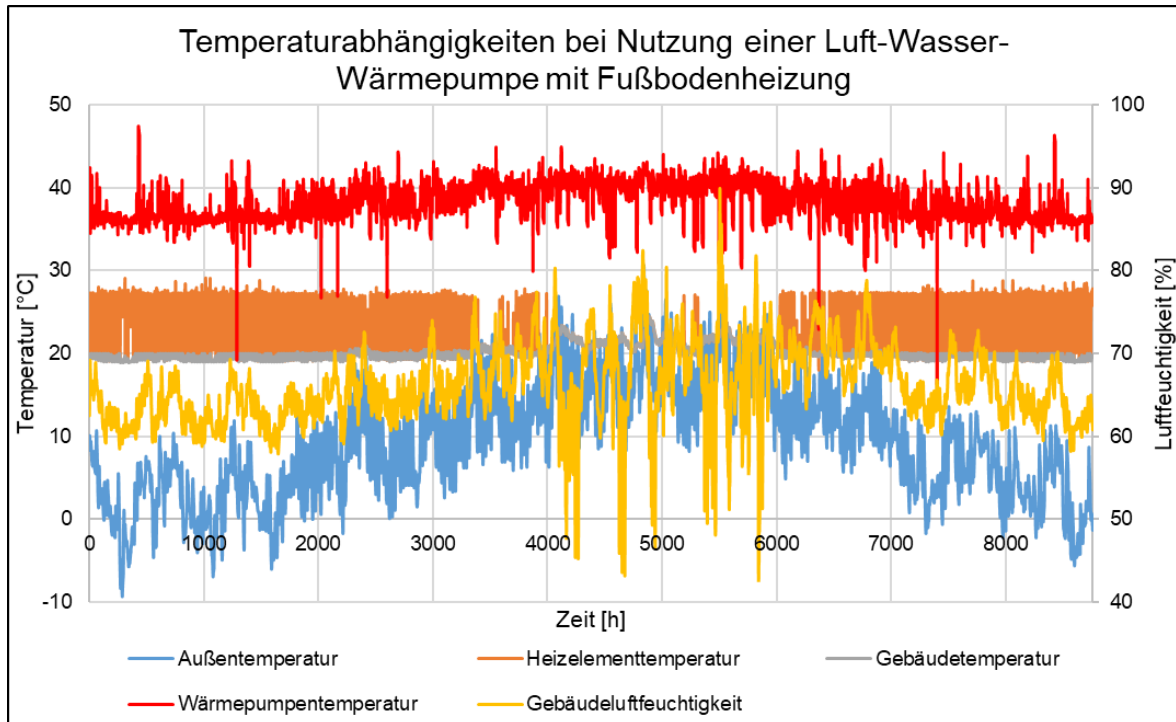


Abbildung 6.32: Temperaturabhängigkeiten L-W und Fußbodenheizung

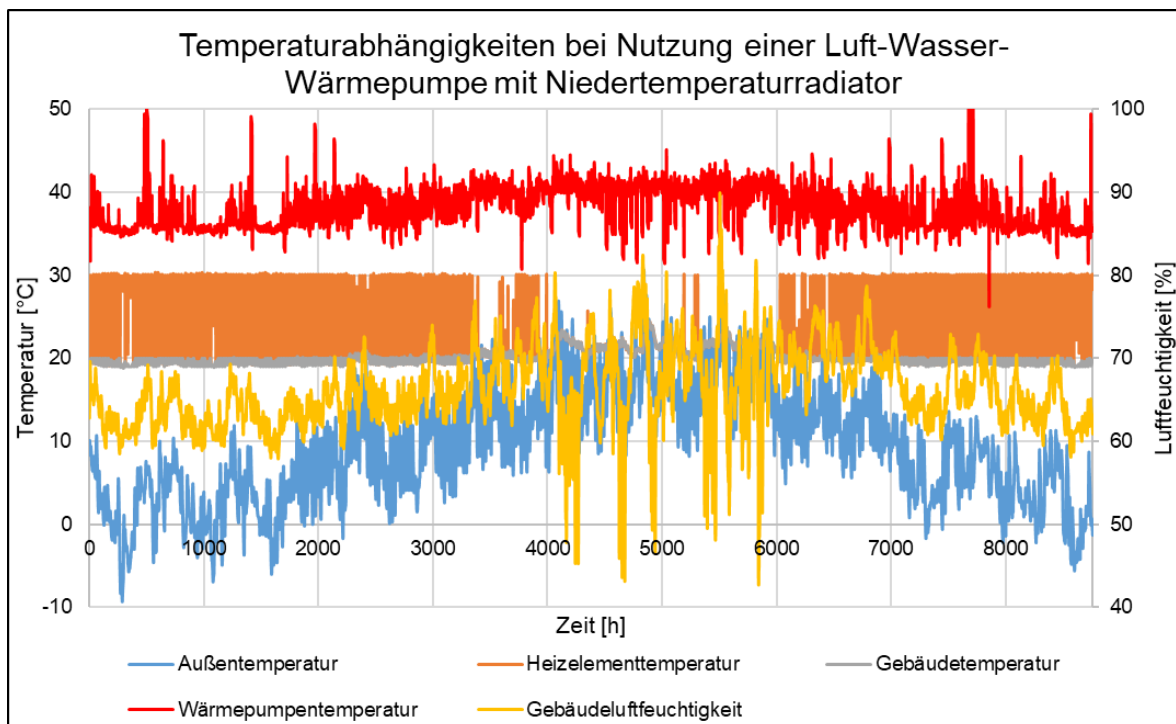


Abbildung 6.33: Temperaturabhängigkeiten L-W und Radiator

In Abbildung 6.32 (Mit Fußbodenheizung) und 6.33 (Mit Niedertemperaturradiator) sind die Temperaturen des Gebäudes, der Heizelemente und der Wärmepumpe sowie die Luftfeuchtigkeit im Zusammenhang mit der Außentemperatur aufgetragen.

Im Vergleich mit der direkten Nahwärmenutzung (Abbildung 6.29) sind leichte Veränderungen der Graphen zu erkennen. Die Wärmepumpentemperatur wird leicht von der Außentemperatur beeinflusst (leichte Wölbung) und liegt die überwiegende Zeit zwischen 35 und 45°C. Durch die Änderung des Heizelements ändert sich die Heizelementtemperatur, da die Vorlauftemperatur bei der Fußbodenheizung geringer als beim Niedertemperaturradiator ist. Die Wahl eines anderen Temperaturniveaus ist infolge nur geringer Veränderungen bei diesem Diagramm zu vernachlässigen.

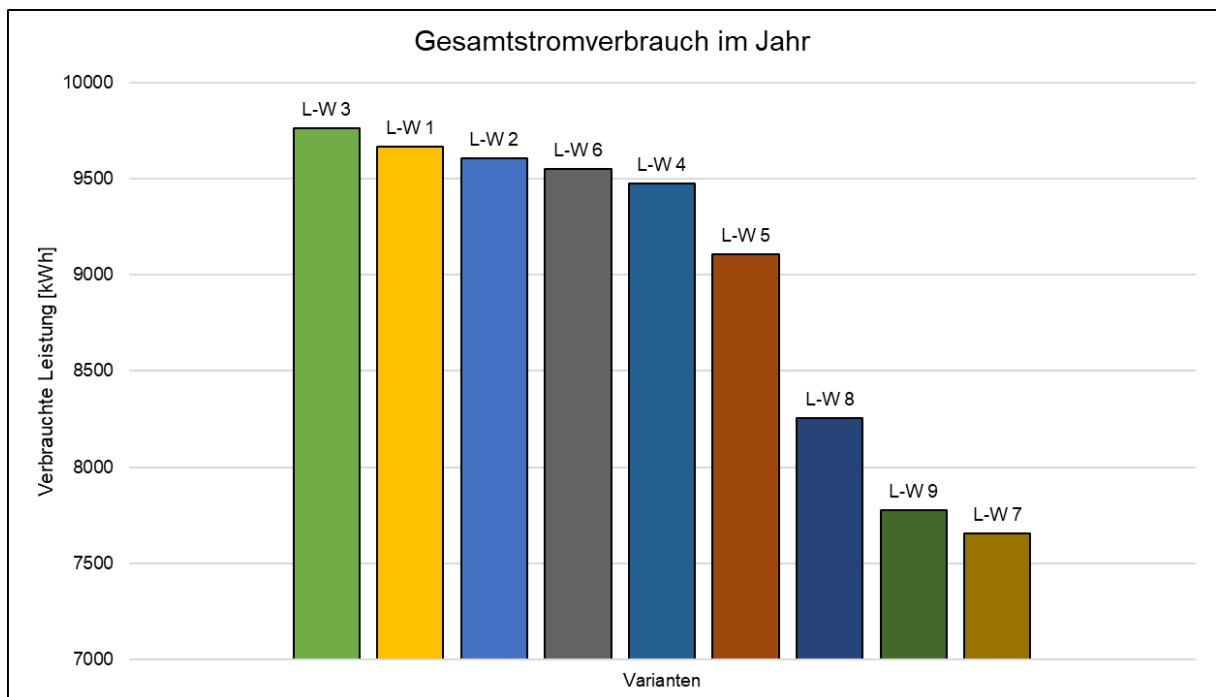


Abbildung 6.34: Gesamtstromverbrauch aller Varianten mit Nutzung einer L-W

In Abbildung 6.34 sind die Stromverbräuche der neun Varianten des Modells Luft-Wasser-Wärmepumpe pro Jahr aufgeführt.

*L-W 1* und *L-W 4*: Der Stromverbrauch bei Verwendung einer Fußbodenheizung als Heizelement ist bei den unteren beiden Temperaturniveaus in der Mitte angesiedelt.

*L-W 2* und *L-W 5*: Die Kombination von Radiator und Fußbodenheizung erscheint als gute Maßnahme, da die Soll-Rücklauftemperatur des Radiators der Soll-Vorlauftemperatur der Fußbodenheizung entspricht. Bei den beiden unteren Temperaturniveaus verbraucht diese Kombination am wenigsten Strom.



*L-W 3* und *L-W 6*: Die Verwendung von Niedertemperaturradiatoren als Heizelement verbraucht in den unteren Temperaturniveaus durch die zu geringen Vorlauftemperaturen und die benötigte Temperaturerhöhung am meisten Strom.

*L-W 7*: Bei dem höchsten Temperaturniveau hat die Nutzung einer Fußbodenheizung als Heizelement den geringsten Stromverbrauch.

*L-W 8*: Bei dem höchsten Temperaturniveau 30-70°C hat die Kombi Variante aus Radiator und Fußbodenheizung jedoch im Gegensatz zu den unteren beiden Temperaturniveaus den höchsten Verbrauch.

*L-W 9*: Die Nutzung eines Niedertemperaturradiators als Heizelement ist mit seinem Stromverbrauch mit dem höchsten Temperaturniveau in der Mitte angesiedelt.

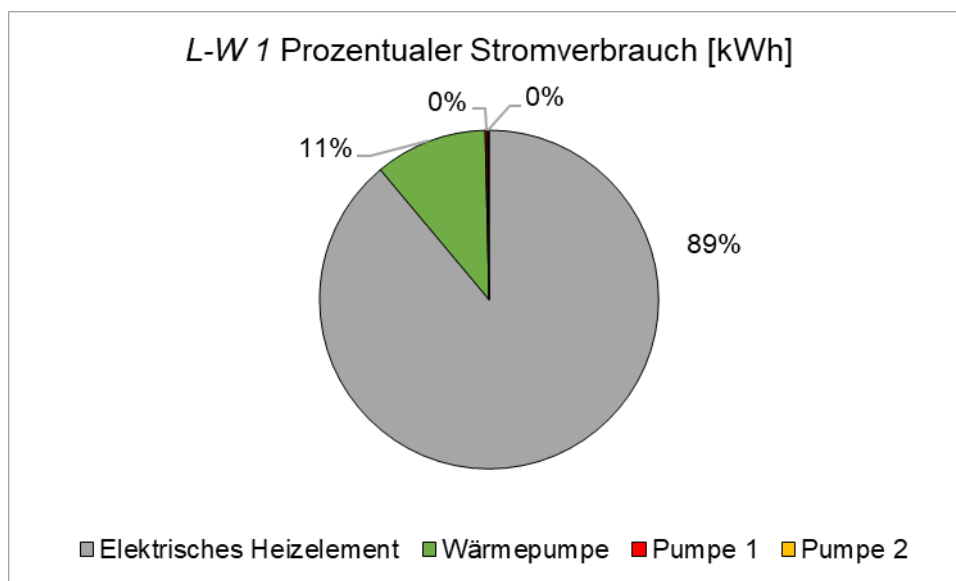


Abbildung 6.35: Stromverbrauch von L-W 1 im Detail

In Abbildung 6.35 ist der prozentuale Stromverbrauch der Nahwärmenutzung mit Luft-Wasser-Wärmepumpe Variante 1 dargestellt. Das elektrische Heizelement nimmt mit 89% den größten Teil des Verbrauchs ein. Die Wärmepumpe nimmt 11% ein. Der Verbrauch der Pumpen ist im Vergleich verschwindend gering und beträgt deshalb jeweils 0%. Bei den anderen Luft-Wasser-Wärmepumpen Varianten verhält sich der prozentuale Stromverbrauch ähnlich.

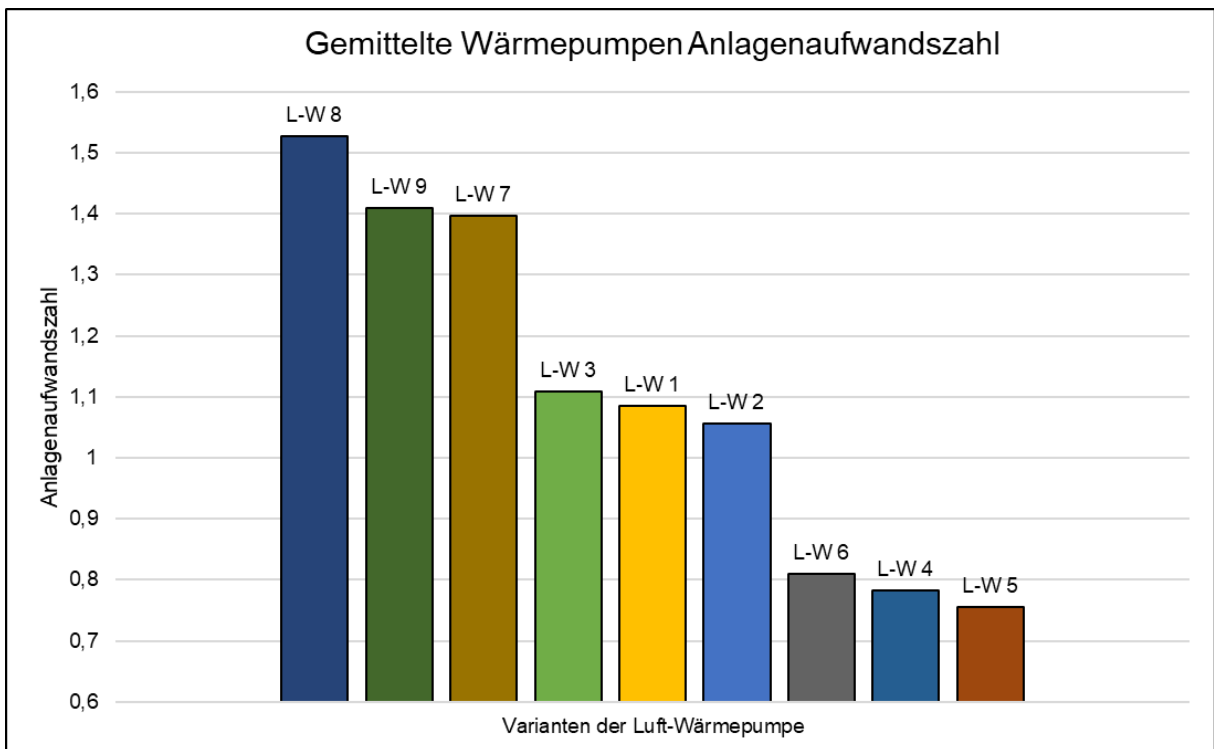


Abbildung 6.36: Übers Jahr gemittelte Wärmepumpen Anlagenaufwandszahl

In Abbildung 6.36 sind die gemittelten Anlagenaufwandszahlen (Siehe Glossar) der Wärmepumpen vergleichend dargestellt. Je niedriger die Anlagenaufwandszahl, desto besser ist der Wärmepumpenwirkungsgrad. *L-W 8* schneidet am schlechtesten ab, während *L-W 5* die niedrigste Anlagenaufwandszahl und somit den besten Wirkungsgrad aufweist.

## 6.4 Vergleich und Bewertung der Experimente

Nachfolgend werden die simulierten Ergebnisse miteinander verglichen und bewertet.

### 6.4.1 Energetischer Vergleich aller zwölf Varianten

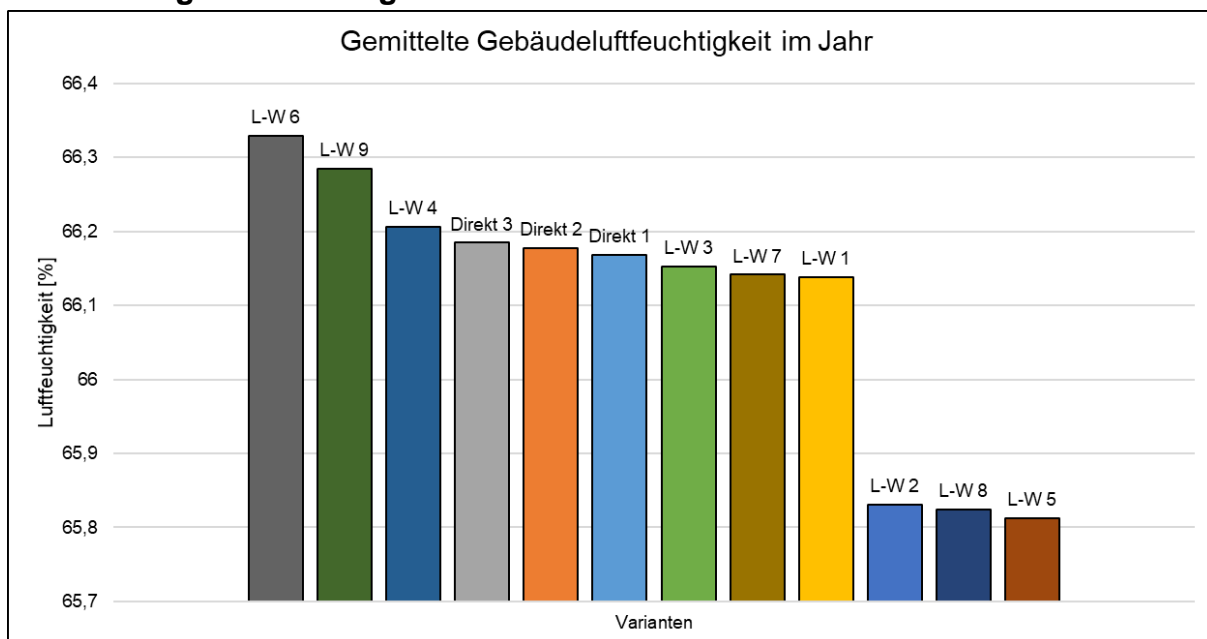


Abbildung 6.37: Vergleich der gemittelten Gebäudeluftfeuchtigkeit pro Jahr aller Varianten

In Abbildung 6.37 ist die übers Jahr gemittelte Gebäudeluftfeuchtigkeit aller zwölf Varianten aufgetragen. Diese liegt bei allen Varianten nah beieinander. Der größte Unterschied zwischen *L-W 6* und *L-W 5* ist mit etwa 0,5% vernachlässigbar klein und wird keine wahrnehmbaren Auswirkungen auf das menschliche Wohlbefinden haben.

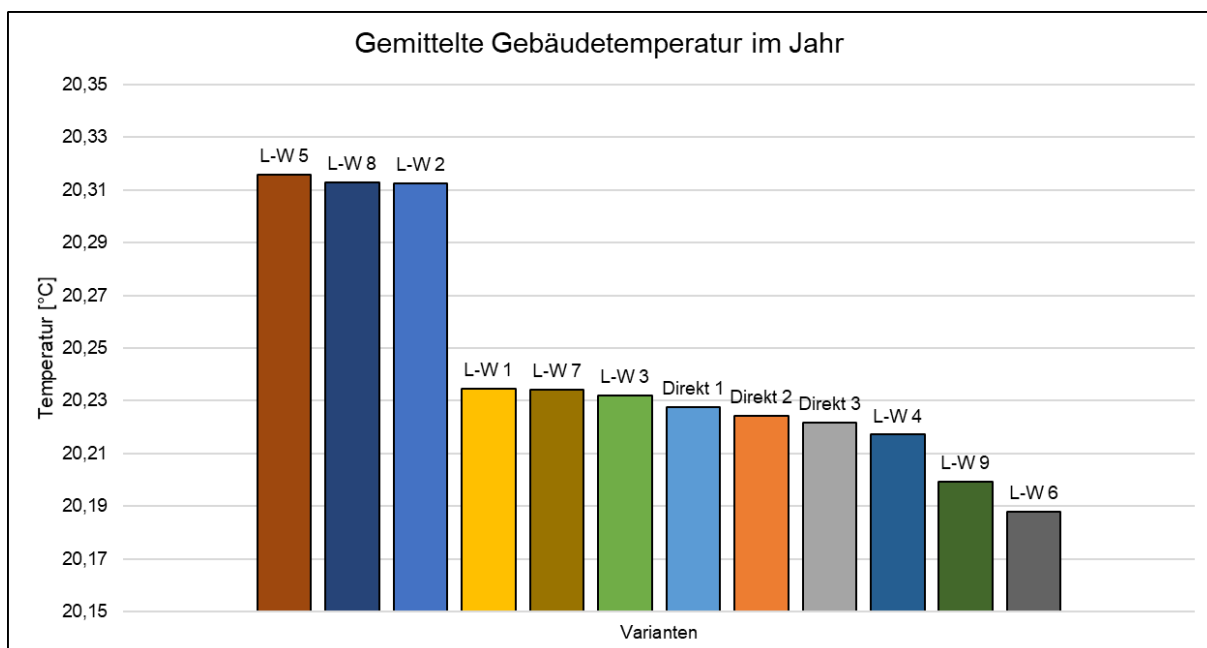


Abbildung 6.38: Vergleich der Gebäudetemperatur aller Varianten

In Abbildung 6.38 sind die übers Jahr gemittelten Gebäudetemperaturen aller zwölf Varianten aufgetragen. Diese ist bei allen sehr ähnlich. Der größte Unterschied zwischen *L-W 5* und *L-W 6* ist mit etwa  $0,12^{\circ}\text{C}$  vernachlässigbar klein und wird keine wahrnehmbaren Auswirkungen auf das menschliche Wohlbefinden haben.

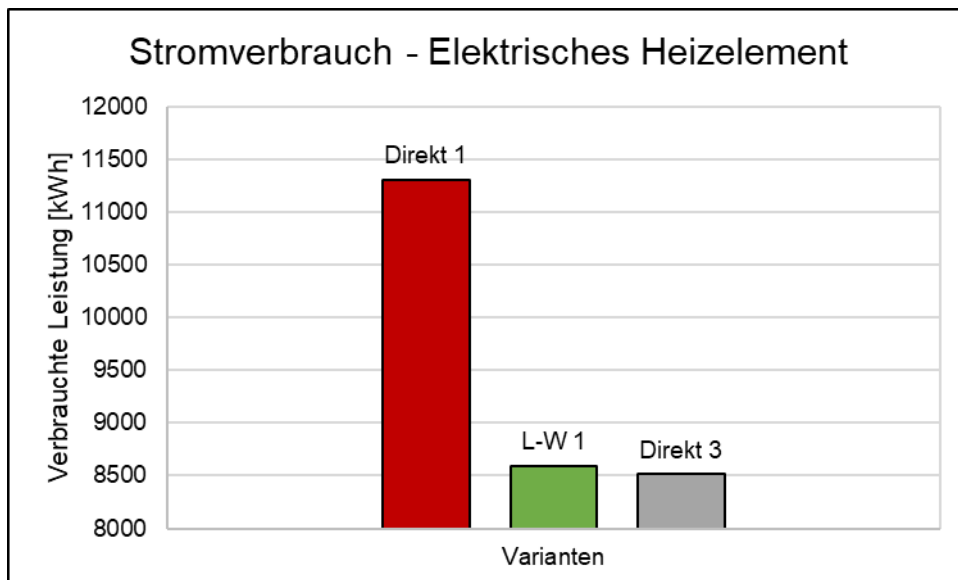


Abbildung 6.39: Vergleich vom Stromverbrauch des elektrischen Heizelements

In Abbildung 6.39 ist der Stromverbrauch des elektrischen Heizelements von der Variante *Direkt 1*, *Direkt 3* und *L-W 1* aufgetragen. Diese drei Varianten wurden ausgewählt, da sie den stärksten Kontrast zwischen den beiden Modellen „Direkte Nutzung der Nahwärme“ und „Luft-Wasser-Wärmepumpe“ darstellen.

Variante *Direkt 1* verbraucht im Gegensatz zu *L-W 1* deutlich mehr Strom, um das Trinkwarmwasser mit einem elektrischen Heizelement zu erwärmen. Deshalb wird diese nicht konkurrenzfähig sein. Durch das hohe Temperaturniveau verbraucht die Variante *Direkt 3* verglichen mit *L-W 1* jedoch etwas weniger Strom durch das elektrische Heizelement und ist damit wieder wettbewerbsfähig.

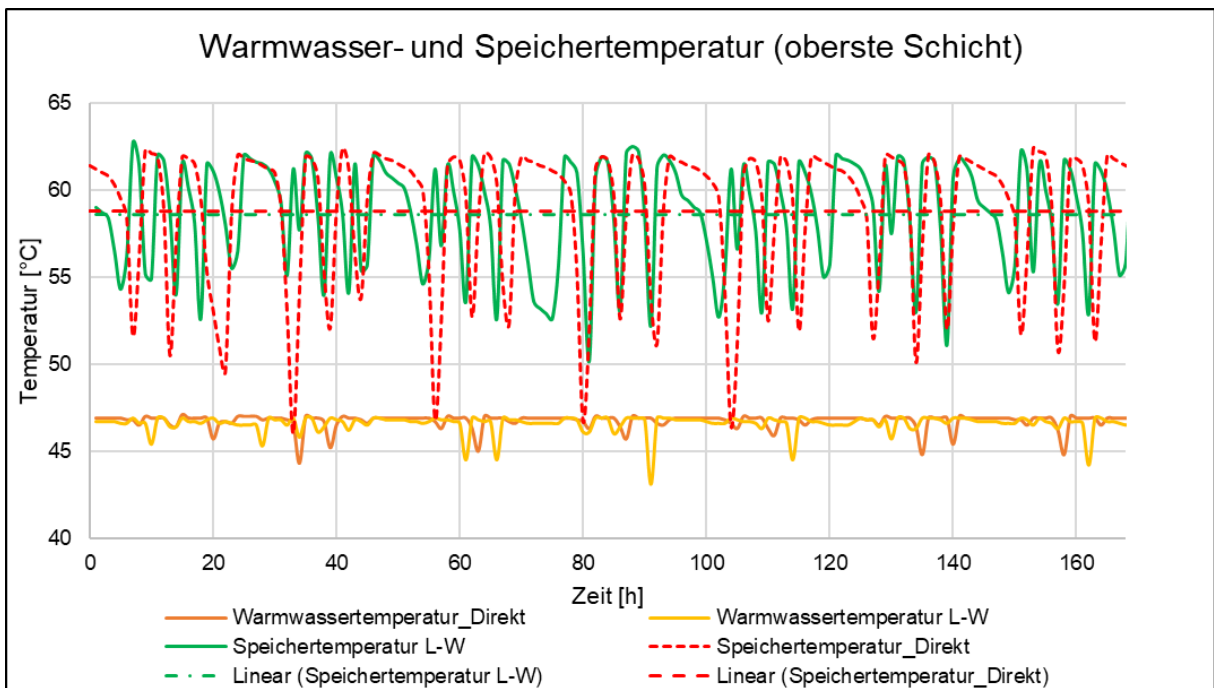


Abbildung 6.40: Warmwasser- und oberste Schichttemperatur des Warmwasserspeichers

In Abbildung 6.40 sind die Temperaturen des Warmwassers sowie die der obersten Speicherschicht der beiden Modelle „Direkte Nutzung der Nahwärme“ und „Luft-Wasser-Wärmepumpe“ über einen Zeitraum von einer Woche aufgetragen. Aus dem Diagramm geht hervor, dass die Temperatur täglich mindestens einmal über 60°C angehoben wird. Damit ist die Gefahr der Legionellen-Bildung gebannt. Weiterhin ist die Warmwassertemperatur und die Speichertemperatur bei dem Modell der direkten Nahwärmenutzung minimal höher

## Stromverbrauchsermittlung ohne zusätzliche Wärmepumpe

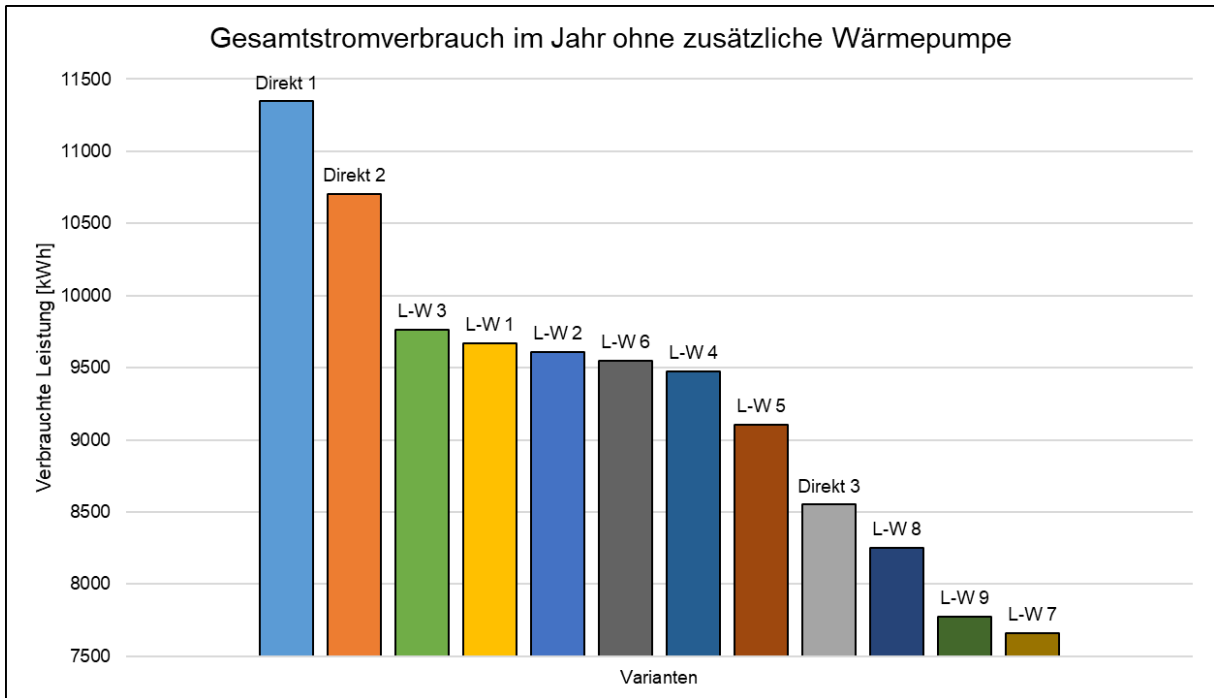


Abbildung 6.41: Vergleich des Stromverbrauchs pro Jahr ohne zusätzliche Wärmepumpe

In Abbildung 6.41 sind die Gesamtstromverbräuche aller zwölf Varianten ohne erzeugerseitige Wärmepumpe dargestellt. Die Varianten *Direkt 3*, *L-W 8*, *L-W 9* und *L-W 7* haben einen besonders niedrigen Stromverbrauch, wobei *L-W 7* mit 7658 kWh den geringsten Verbrauch aufweist. Es ist ersichtlich, dass die Wahl des Temperaturniveaus den Stromverbrauch stark beeinflusst. Somit sind die Varianten mit niedrigem Temperaturniveau in ihrem Stromverbrauch höher.

Jedoch ist die Nutzung des höchsten Temperaturniveaus fragwürdig, da die Öl-Kühler-Temperatur mithilfe einer Wärmepumpe erzeugerseitig um eine Temperatur  $\Delta t$  von maximal 10 K von 60 auf 70°C angehoben werden müsste.

## Stromverbrauchsermittlung mit zusätzlicher Wärmepumpe

Nachfolgend wird der zusätzlich anfallende Stromverbrauch bei Verwendung des höchsten Temperaturniveaus durch die erzeugerseitige Wärmepumpe berechnet.

Mit der Gleichung (6.1) kann die benötigte Heizleistung  $Q_{HW}$  berechnet werden [1].

$$Q_{HW} = \dot{m} * c_{p,W} * \Delta t \quad (6.1)$$

Eingesetzt in die Gleichung (6.1) ergibt sich eine Heizleistung  $Q_{HW}$  von 138,87 kW.

Die Wärmepumpe *Vitocal 300-W Pro WW 302 B155* des Herstellers Viessmann hat bei einer Heizleistung von 145,1 kW eine elektrische Leistung  $P_{EW}$  von 24,4 kW (Siehe Datenblattausschnitt im Anhang).

Die Nahwärmtemperatur ist bedingt durch die ermittelte Heizkurve für das höchste Temperaturniveau eine Zeit  $t$  von 1254 Stunden im Jahr höher als 60°C. Die zusätzliche Wärmepumpe müsste diese Zeit arbeiten. Der Durchschnitt aller Temperaturen zwischen 60 und 70°C beträgt im Jahr 63,5 °C. Somit wird nicht immer die volle Heizleistung benötigt. Es wird angenommen, dass die Wärmepumpe im Durchschnitt mit 40% Leistung arbeitet.

$$Q_{EW} = P_{EW} * 40\% * t \quad (6.2)$$

Eingesetzt in die Gleichung (6.1) ergibt sich für die Anhebung des Temperaturniveaus der gesamten Nahwärme ein zusätzlicher Verbrauch  $Q_{EW}$  von 12.240 kWh. Da die Mitarbeiterunterkunft mit 50 kW lediglich ein Zehntel der gesamten Nahwärmeleistung benötigt, würde der dafür nötige zusätzliche Stromverbrauch 1224 kWh betragen.

Mit Addition des zusätzlichen Stromverbrauchs bei Varianten mit Nutzung des höchsten Temperaturniveaus entsteht die folgende Abbildung 6.42.

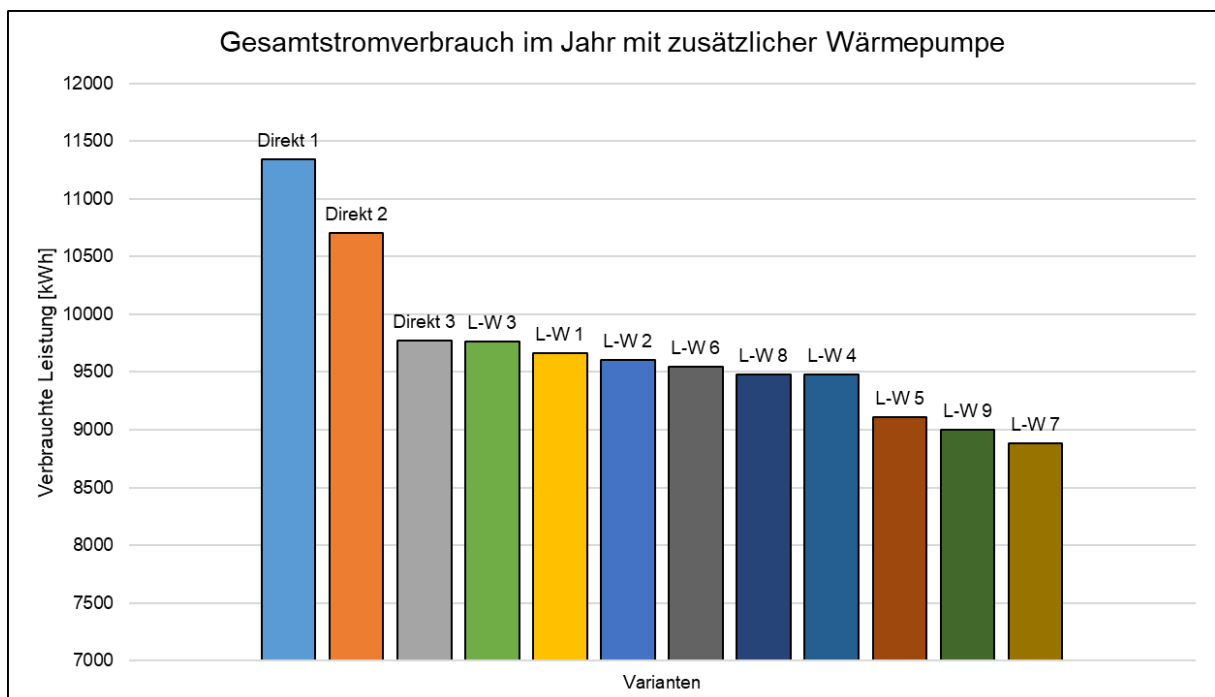


Abbildung 6.42: Gesamtstromverbrauch aller Varianten pro Jahr mit L-W

Aus Abbildung 6.42 geht hervor, dass die Varianten mit dem höchsten Temperaturniveau durch den zusätzlichen Stromverbrauch angestiegen sind.

Die sieben Varianten *Direkt 1*, *Direkt 2*, *L-W 3*, *L-W 1*, *L-W 2*, *L-W 6* und *L-W 4* werden nachfolgend nicht weiter betrachtet, da diese einen größeren Stromverbrauch aufweisen.

*Direkt 3* und *L-W8*: Unter reiner Betrachtung des Stromverbrauchs sind diese beiden Varianten durch den zusätzlichen Stromverbrauch nicht mehr konkurrenzfähig.

*L-W 5*: Aufgrund der Nutzung des mittleren Temperaturniveaus wird keine weitere Anhebung benötigt. Die Variante *L-W 5* hat mit Verwendung der Kombination von Fußbodenheizung und Niedertemperaturradiator einen Stromverbrauch von 9106 kWh.

*L-W 9* und *L-W 7*: Trotz der zusätzlichen Anhebung haben diese zwei Varianten noch den geringsten Stromverbrauch. Die Variante *L-W 7* hat mit 8882 kWh den geringsten Verbrauch dicht gefolgt von *L-W 9* mit 9001 kWh.



## 6.4.2 Wirtschaftlichkeitsberechnung

Mithilfe der folgenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen wird untersucht, welche der 3 Varianten (*L-W 5*, *L-W 9*, *L-W 7*) die wirtschaftlichste ist. Weiterhin wird die Wirtschaftlichkeit von Variante *Direkt 3* zum Vergleich, da die Kosten für eine Wärmepumpe bei der direkten Nutzung entfallen, zusätzlich berechnet.

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung wird die Kapitalwertmethode verwendet. Die Kapitalwertmethode ist eine dynamische Investitionsrechnung, die den Fälligkeitszeitpunkt der anfallenden Zahlungen sowie Opportunitätskosten (Siehe Glossar) berücksichtigt. Es fließen die Anfangsinvestitionskosten, die jährlichen Kosteneinsparungen, die Dauer des Betrachtungszeitraums sowie der kalkulatorische Zinssatz mit in die Berechnung ein. Die Arbeitszeit der Ersteinrichtung und die verringerten Wartungskosten werden im Rahmen dieser Kostenschätzung nicht berücksichtigt. Diese Wartungskosten sind nur wenig relevant und würden das Ergebnis nicht weiter verbessern, da die vorgeschlagenen Maßnahmen eher geringere Wartungskosten verursachen.

Durch die Diskontierung der anfallenden Zahlungen auf den Investitionszeitpunkt mit Hilfe des kalkulatorischen Zinssatzes werden die entgangenen Zinsen berücksichtigt, die durch eine alternative Investition entstehen würden. Bei einem positiven Kapitalwert ist die Investition als wirtschaftlich zu betrachten.

Tabelle 6.8: Benötigte Begriffe für die Berechnung des Kapitalwerts

| Symbol | Begriff                       |
|--------|-------------------------------|
| $z$    | Kalkulatorischer Zinssatz [%] |
| $t$    | Betrachtungszeitraum [a]      |
| $I_0$  | Anfangsinvestition [€]        |
| $Z$    | Kosteneinsparung [€]          |
| $q$    | Abzinsungsfaktor              |

Die folgenden Berechnungen werden mit der Kapitalwertgleichung (6.3) berechnet.

$$K = -I_0 + \sum_{t=1}^{t=n} \frac{Z}{q^t} \quad (6.3)$$

Für die kommenden Berechnungen des Kapitalwerts  $K$  wurde ein kalkulatorischer Zinssatz von 5% und ein Abzinsungsfaktor von 1,05 angenommen. Als

Betrachtungszeitraum werden 20 Jahre angenommen, da dies der typischen Lebenszeit einer Wärmepumpe entspricht [1].

Auf Nachfrage beim Hersteller Dimplex GmbH betragen die Kosten der bei Variante L-W 5 verwendeten Wärmepumpe LA 6TU in der Neuanschaffung 6935 €. Dieser Preis wird auch für die Wärmepumpe CalorMax der Firma Sunerg Solar s.r.l. der Varianten L-W 7 und L-W 9 angenommen.

Für den Trinkwarmwasserspeicher wird das Modell Vitozell 100-V mit einem Volumen von 160 l und 500 l von der Firma Viessmann verwendet. Auf Nachfrage beträgt der Preis in der Neuanschaffung einmal 750 und 1700 €.

Für die verwendeten Umwälzpumpen wird die Pumpe IMP NMT LAN 40-120 der Firma NMT verwendet. Diese hat einen maximalen Durchsatz von  $12.500 \frac{l}{h}$  und der Preis beläuft sich auf 900 €.

Die zusätzlichen zu den Heizelementen anfallenden Kosten  $K_G$  betragen bei Verwendung eines großen Warmwasserspeichers 10.435 € und die Kosten  $K_K$  für einen kleinen 9485 €. Bei der Variante Direkt 3 wird keine Wärmepumpe benötigt und die Kosten belaufen sich auf lediglich 3500 €.

Um die Kosten für die Heizungselemente und den Einbau  $K_{R/F}$  zu berechnen wird die folgende Formel verwendet.

$$K_{R/F} = A_{Hi} * H_i * \frac{\text{Preis für Material und Einbau}}{m^2} \quad (6.4)$$

$A_H$  : Fläche des Bauteils

$H_i$  : Heizelementanzahl

$K_{R/F}$  : Kosten für Radiator oder Fußbodenheizung mit Einbau

$$I_0 = K_{G/K} + K_{R/F} \quad (6.5)$$

### 6.4.3 Wirtschaftlichkeitsberechnung für die Variante L-W 5

In dieser Variante wird eine Kombination aus Fußbodenheizung und Niedertemperaturradiatoren verwendet.

Eine Fußbodenheizung in ein Bestandsgebäude zu integrieren ist aufwendig aber möglich. Es wird ein Preis mit Einbau von  $100 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$  angenommen.

Bei einer Fläche von 11 m<sup>2</sup> pro Heizelement und 35 Heizelementen würden sich die Kosten  $K_F$  für die Fußbodenheizung eingesetzt in die Gleichung (6.4) auf 38.500 € belaufen.

Zusätzlich würden bei dieser Variante 30 Niedertemperaturradiatoren zum Einsatz kommen. Hier wird ein Preis mit Einbau von  $300 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$  angenommen. Bei einer Fläche von 2,5 m<sup>2</sup> pro Heizelement würden sich die Kosten  $K_R$  für die Niedertemperaturradiatoren eingesetzt in die Gleichung (6.4) auf 22.500 € belaufen.

Die gesamten Anfangsinvestitionskosten  $I_0$  setzen sich bei Variante L-W 5 aus  $K_F$ ,  $K_R$  und  $K_G$  zusammen. Durch Einsetzen in die Gleichung (6.5) ergeben sich Anfangsinvestitionskosten  $I_0$  von 71.435 €.

Bei einem gemittelten jährlichen Ölpreis von  $63,3 \frac{\text{Cent}}{\text{l}}$  im Jahr 2017 und einem Öl-Verbrauch von  $14.000 \frac{\text{l}}{\text{a}}$  der derzeitigen Heizungsanlage betragen die Kosten  $8862 \frac{\text{€}}{\text{a}}$  [23]. Der Stromverbrauch beträgt bei dieser Variante 9107 kWh im Jahr. Bei einem Preis von  $0,3 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$  im Jahr 2017 betragen die Stromkosten 2732 € im Jahr [24].

Wenn die Kosten des Stromverbrauchs der neuen Anlage von den Öl-Verbrauchs-Kosten der alten Anlage abgezogen werden entsteht die Kosteneinsparung  $Z$  pro Jahr. Die Kosteneinsparung  $Z$  beträgt damit  $6130 \frac{\text{€}}{\text{a}}$ . Die Wartungskosten werden vernachlässigt, da die Wartungskosten des Konstant-Öl-Kessels, den der Wärmepumpe im Allgemeinen übersteigen.

Durch Einsetzen in die Gleichung (6.3) folgt, dass der Kapitalwert 4958,35 € beträgt.

Durch die Kombination von Fußboden- und Radiatorheizelementen ist es möglich, dass sich die Kosten in 18 Jahren amortisieren. Damit ist diese Variante als wirtschaftlich anzusehen. Weiterhin gilt für alle Varianten, dass die Heizkörper wie auch der Speicher in der Regel länger als 20 Jahre voll funktionstüchtig sind.

#### **6.4.4 Wirtschaftlichkeitsberechnung für die Variante L-W 7**

In dieser Variante wird nur eine Fußbodenheizung verwendet.

Bei 35 Heizelementen würden sich die Kosten  $K_F$  für die Fußbodenheizung eingesetzt in die Gleichung (6.4) auf 38.500 € belaufen. Die gesamten Anfangsinvestitionskosten  $I_0$  setzen sich bei Variante L-W 7 aus  $K_F$  und  $K_K$  zusammen. Durch Einsetzen in die Gleichung (6.5) ergeben sich Anfangsinvestitionskosten  $I_0$  von 48.935 €. Der Stromverbrauch beträgt bei dieser Variante  $8882 \frac{kWh}{a}$ . Die Stromkosten betragen somit  $2665 \frac{€}{a}$ . Die Kosteneinsparung  $Z$  beträgt somit  $6197 \frac{€}{a}$ .

Durch Einsetzen in die Gleichung (6.3) folgt, dass der Kapitalwert 28.293,32 € beträgt.

Durch die Verwendung einer Fußbodenheizung ist es möglich, dass sich die Kosten in 11 Jahren amortisieren. Damit ist diese Variante als wirtschaftlich anzusehen.

#### **6.4.5 Wirtschaftlichkeitsberechnung für die Variante L-W 9**

In dieser Variante werden lediglich Niedertemperaturradiatoren verwendet.

Bei 30 Niedertemperaturradiatoren würden sich die Kosten  $K_R$  eingesetzt in die Gleichung (6.4) auf 22.500 € belaufen. Die gesamten Anfangsinvestitionskosten  $I_0$  setzen sich bei Variante L-W 9 aus  $K_R$  und  $K_K$  zusammen. Durch Einsetzen in die Gleichung (6.5) ergeben sich Anfangsinvestitionskosten  $I_0$  von 31.985 €. Der Stromverbrauch beträgt bei dieser Variante  $9001 \frac{kWh}{a}$ . Die Stromkosten betragen somit  $2700 \frac{€}{a}$ . Die Kosteneinsparung  $Z$  beträgt  $6162 \frac{€}{a}$ .

Der Kapitalwert beträgt demnach 44.808,14 €.

Mit der Wahl von Niedertemperaturradiatoren ist es möglich, dass sich die Kosten in 7 Jahren amortisieren. Diese Variante ist als äußerst wirtschaftlich anzusehen.

### 6.4.6 Wirtschaftlichkeitsberechnung für die Variante Direkt 3

In dieser Variante wird lediglich eine Fußbodenheizung verwendet.

Bei 35 Heizelementen würden sich die Kosten  $K_F$  für die Fußbodenheizung eingesetzt in die Gleichung (6.4) auf 38.500 € belaufen. Die gesamten Anfangsinvestitionskosten  $I_0$  setzen sich bei Variante *Direkt 3* aus  $K_F$  und  $K_G$  zusammen. Durch Einsetzen in die Gleichung (6.5) ergeben sich Anfangsinvestitionskosten  $I_0$  von 42.000 €. Der Stromverbrauch beträgt bei dieser Variante  $9775 \frac{kWh}{a}$ . Die Stromkosten betragen somit  $2932,5 \frac{€}{a}$ . Die Kosteneinsparung  $Z$  beträgt  $5930 \frac{€}{a}$ .

Der Kapitalwert beträgt somit 31.900,91 €.

Auch ohne die Verwendung einer Wärmepumpe können sich die Kosten nach 9 Jahren amortisieren. Damit ist diese Variante als wirtschaftlich anzusehen.

### 6.4.7 Vergleich der Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Tabelle 6.9: Ergebnisse von den Wirtschaftlichkeitsberechnungen

| Variante               | <i>L-W 5</i> | <i>L-W 7</i> | <i>L-W 9</i> | <i>Direkt 3</i> |
|------------------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|
| Investitionskosten [€] | 71.435       | 48.935       | 31.985       | 42.000          |
| Kapitalwert [€]        | 4958         | 28.293       | 44.808       | 31.901          |
| Amortisationszeit [a]  | 18           | 11           | 7            | 9               |

Aus Tabelle 6.9 geht hervor, dass sich durch die Wahl der Variante *L-W 9* die Kosten am schnellsten amortisieren. Weiterhin sind die Investitionskosten dieser Variante am geringsten. Die Varianten *L-W 5* und *L-W 7* schneiden aufgrund der hohen Investitionskosten für die weitere Betrachtung aus.

Die Variante *Direkt 3* konnte durch die zweitgeringsten Investitionskosten profitieren und ist somit die zweitgünstigste Variante.

## **7 Praktischer Ausblick**

Mit Blick auf die konkreten Betriebszeiten und mögliche Störungen und Ausfälle in der Nahwärmeversorgung sollen hier praxisrelevante Aspekte näher betrachtet werden.

Durch den saisonalen Stillstand der Anlage von eineinhalb Monaten (Von Mitte März bis Ende April) ist keine Nahwärme gewährleistet. Weiterhin steht bei Wartungs- und Umbaumaßnahmen oder Ähnlichem keine oder eine unzureichende Abwärmeleistung zur Verfügung. Der schlimmste Fall, der eintreten könnte, wäre, wenn für das Gebäude in der Heizperiode keine Nahwärme zur Verfügung stehen würde.

Damit dieser Fall nicht eintritt, soll nun über zusätzliche Möglichkeiten der Wärmespeicherung und oder -erzeugung nachgedacht werden.

Für die weitere Betrachtung und Auswahl der Speicher wie auch der Erzeuger wird die gesamte Siedlung mit einer Nahwärmeleistung von 500 kW verwendet, da die Wärmeerzeugung oder Speicherung zentral durch geringere Speicherverluste effektiver ist als die Verwendung verteilter einzelner Anlagen.

### **7.1 Möglichkeiten der Wärmespeicherung**

Der Wärmebedarf des Gebäudes variiert mit den Außentemperaturen. Vor allem in warmen Zeiten, bei hoher Auslastung der Kältemaschine wird die Abwärme lediglich zur Trinkwassererhitzung benötigt. Um die Abwärmenutzung effizienter zu gestalten und einem Ausfall vorzubeugen, könnte ein thermischer Zwischenspeicher die Lösung sein.

Damit ein Wärmespeicher für die Nahwärmenutzung ökonomisch in Frage kommt, müsste dieser die folgenden Eigenschaften aufweisen [25]:

- Niedertemperaturfähig (Ent-/Ladetemperaturen) im Bereich von 30 bis 70°C
- Saisonale Speicherfähigkeit
- Niedrige Speicherverluste
- Ausreichend große Speicherkapazität im Bereich von mehreren 100 MWh
- Ausreichend große Ent-/Ladeleistung im Bereich mehrerer 100 kW

Nachfolgend werden einige Speichertechnologien vorgestellt und ein für den vorliegenden Fall passendes Speichersystem benannt.

### **7.1.1 Sensible Wärmespeichersysteme**

Die Nutzung von sensiblen (fühlbaren) Speichern beruht auf der Erwärmung oder Kühlung eines Speichermediums wie z.B. Wasser [25]. Diese Systeme werden meistens zur Warmwasserspeicherung in Gebäuden, als Pufferspeicher für Solaranlagen oder als große Erd-Speicher für saisonale Speicherung verwendet [25]. Dabei ist es möglich, die nicht benötigte Wärme im Sommer zu speichern und im Winter abzugeben. Auch ist es möglich, im Sommer durch Nutzung der Erdwärme die Gebäude abzukühlen. Bei sehr hohen Temperaturen werden vorwiegend Feststoffe als Speichermedium verwendet [25]. Sensible Speichersysteme lassen sich nur mit großen Speichervolumina und damit für große Energiemengen effizient und wirtschaftlich nutzen. Je größer das Volumen des Speichers wird, desto geringer sind die Baukosten pro m<sup>3</sup> [25].

### **7.1.2 Latentwärmespeichersysteme**

Die Verwendung von Latentwärmespeichern zeichnet sich durch die Nutzung des Phasenübergangs eines Speichermediums aus. Typischerweise wird der Phasenübergang Fest-Flüssig genutzt, da dort eine hohe Übergangsenthalpie entsteht und sich das Volumen nur leicht ändert [25]. Somit können bereits durch kleine Temperaturunterschiede große Wärmemengen gespeichert werden. Mögliche Speichermaterialien sind von -40 bis weit über 1000°C bekannt [25]. Früher wurde das Eis aus dem Winter im Sommer zum Kühlen verwendet. Dabei hat 1 t Eis eine Kühlkapazität von ca. 92MWh [25]. Latentwärmespeicher können hohe Speicherkapazitäten und große Entladeleistungen haben. Durch die Verwendung eines modernen Eisspeichers sind diese auch Langzeitspeicherfähig. Die Preise für latente Wärmespeicher sind höher als die von sensiblen Wärmespeichern [25].

### **7.1.3 Thermochemische Speichersysteme**

Bei thermochemischen Speichern wird Wärme durch reversible chemische Reaktionen gespeichert [25]. Speicher dieser Art verfügen über hohe Energiespeicherdichten und sind in der Lage die Entladetemperaturen den aktuellen Bedürfnissen anzupassen. Auch besteht die Möglichkeit Wärme in Kälte umzuwandeln [25]. Thermodynamische Speicher sind in Ihrer Speicherkapazität auf einige MWh begrenzt.

### 7.1.4 Vergleich und Wahl eines passenden Speichersystems

Da die thermochemischen Speichersysteme eine zu geringe Speicherkapazität haben, fallen diese für die weitere Betrachtung weg [25].

Da Latentwärmespeicher für saisonale Speicherungen, also eine nur geringe Zyklen-Anzahl, in der Anschaffung bei der geforderten Speicherkapazität zu teuer sind, werden die sensiblen Speichersysteme nachfolgend näher betrachtet [25].

Mithilfe der folgenden Berechnung werden die Investitionskosten für einen Warmwasserspeicher berechnet.

Es wird angenommen, dass der Speicher eine Kapazität von 500 MWh hat. Die maximale Speichertemperatur  $t_2$  beträgt  $70^\circ\text{C}$ . Die minimale Temperatur  $t_1$  beträgt  $35^\circ\text{C}$ . Die Temperaturdifferenz  $\Delta t$  beträgt  $35^\circ\text{C}$ . Um das Speichervolumen berechnen zu können, muss die Wärmekapazität des Speichermediums berücksichtigt werden.

Die Verwendung des Speichermediums Wasser ist am preiswertesten und am sichersten.

$$V_{\text{Speicher}} = \frac{\text{zu speichernde Wärmeenergie} * 3,6}{c_{p,W} * \Delta t * \rho_W} \quad (6.6)$$

Eingesetzt in Gleichung (6.5) ergibt sich ein Volumen  $V_{\text{Speicher}}$  von  $12.303,49 \text{ m}^3$ .

Mithilfe der folgenden Abbildung 7.43 können die Kosten für den Bau eines Warmwasserspeichers ermittelt werden.

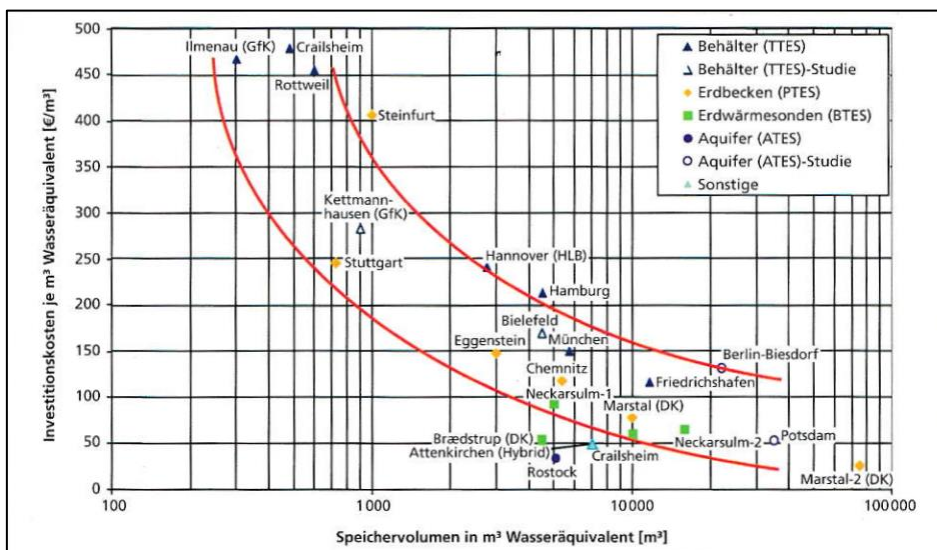


Abbildung 7.43: Investitionskosten pro  $\text{m}^3$  Warmwasserspeicher

Bei einem Volumen von  $12.303,49 \text{ m}^3$  würden die Investitionskosten pro  $\text{m}^3$  Speicher etwa  $50 \text{ €}$  betragen. Damit würden sich die Gesamtinvestitionskosten  $I_0$  auf  $615.174,5 \text{ €}$  belaufen.



Unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen und den Stromverbräuchen ist es fraglich, ob bei diesen immensen Investitionskosten der Bau und Betrieb wirtschaftlich sein kann. Dies könnte sich jedoch in Zukunft bei ansteigenden Brennstoffkosten und bei geringeren Investitionskosten infolge neuerer Technologien durchaus ändern.

## **7.2 Zusätzliche Wärmeerzeugung**

Alle zwölf Varianten besitzen bereits ein elektrisches Heizelement, das die Warmwassertemperatur auch im Fall von unzureichender oder fehlender Nahwärme aufrechterhalten kann. Es werden nun drei Varianten einer zusätzlichen Wärmeerzeugung analysiert.

### **7.2.1 Elektrisches Heizelement**

Die Beheizung des Gebäudes mithilfe eines elektrischen Heizelements ist aufgrund der geringen Effizienz und des hohen Stromverbrauchs äußerst unwirtschaftlich und wird deshalb nicht weiter betrachtet.

### **7.2.2 Blockheizkraftwerk als zusätzlicher Wärmeerzeuger**

Die Wahl eines BHKW könnte von Vorteil sein, da der zusätzlich entstehende Strom direkt z.B. für die Gemüsekühlung genutzt oder ins Stromnetz gespeist werden könnte. Das Modell GG 395 der Firma Sokratherm erzeugt bei einem Gasverbrauch von 999 kW 505 kW thermische Leistung und 397 kW elektrische Energie. Der Gesamtwirkungsgrad dieser Anlage beläuft sich auf etwa 90 % (Siehe Datenblattausschnitt im Anhang).

Die Investitionskosten mit Einbau und Anschluss belaufen sich auf 375.000 €.

Wenn das BHKW jedoch nur maximal eineinhalb Monate im Jahr in Betrieb wäre, könnte der Einsatz durch zu hohe Wartungskosten nicht wirtschaftlich sein. Nur wenn ein kontinuierlicher unterstützender Betrieb möglich wäre, könnte dies eine wirtschaftliche Alternative zu einem saisonalen Speicher sein. Das BHKW wird deshalb nicht weiter betrachtet.

### 7.2.3 Brennwertkessel als zusätzlicher Wärmeerzeuger

Der Brennwertkessel *Vitocrossal 300 Typ CT3B* der Firma Viessmann mit einer Leistung von 500 kW und einem Wirkungsgrad  $\eta_{BK}$  von 98% (Siehe Datenblatt-ausschnitt im Anhang) liegt preislich im Bereich von 32.000 €.

Jedoch muss auch bei Wahl eines Brennwertkessels bedacht werden, dass dieser in der Wirtschaftlichkeit sinkt, wenn eine zu geringe Betriebszeit pro Jahr vorhanden ist. Unter der Annahme, dass eine leichte Unterstützung stattfindet, wird in der folgenden Berechnung ermittelt, wie hoch die Kosten für das benötigte Erdgas sind.

$$Q_{AB} = (Q_V + Q_M) * t \quad (6.7)$$

In einem Zeitraum  $t$  von eineinhalb Monaten wird für die Nahwärmeversorgung der Siedlung eine Wärmeenergie  $Q_{AB}$  mithilfe der Formel von maximal 540 MWh benötigt.

$$V_{Erdgas} = \frac{Q_{AB}}{ErdgasHeizwert * \eta_{BK}} \quad (6.8)$$

$\eta_{BK}$  : Wirkungsgrad des Brennwertkessels

Bei einem gemittelten Erdgas-Heizwert von  $10 \frac{kWh}{m^3}$  bei einem Wirkungsgrad  $\eta_{BK}$  von 98% würde der Erdgasverbrauch  $V_{Erdgas}$  des Brennwertkessels  $55.102 m^3$  betragen [3].

$$K_{Erdgas} = V_{Erdgas} * ErdgasHeizwert * \frac{Kosten}{kWh} \quad (6.9)$$

Bei einem Erdgaspreis von  $6,7 \frac{Cent}{kWh}$  im Jahr 2017 ergibt sich mit der Gleichung (6.9) ein Preis von 36.918€ [26].

Somit ergeben sich einmalige Investitionskosten von 32.000 € sowie jährliche Brennstoffkosten von 36.918 € (Bei eineinhalb-monatigem Betrieb). Bei einer Laufzeit von 20 Jahren und der Annahme, dass der Erdgaspreis konstant bleibt, würden sich die Kosten unter Vernachlässigung des Wartungsaufwands auf 770.360 € belaufen.

### **7.3 Vergleich der Kosten für Wärmespeicher und zusätzlichem -erzeuger**

Für eine Wirtschaftlichkeitsberechnung des Warmwasserspeichers wird eine Laufzeit  $t$  von 20 Jahren angenommen. Die Investitionskosten betragen 615.174,5 €. Die Kosteneinsparung durch Brennstoff beträgt jährlich im Vergleich zum Brennwertkessel 36.918 €.

Eingesetzt in die Kapitalwertgleichung (6.3) ergibt sich ein Kapitalwert  $K$  von -155.094,62 €.

Damit ist es nicht möglich, dass sich die Mehrkosten innerhalb von 20 Jahren amortisieren. Erst nach mehr als 30 Jahren amortisieren sich die Kosten. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der Speicher eine deutlich längere Lebenszeit als 20 Jahre aufweist und dass die Erdgaskosten in Zukunft durch endliche Ressourcen ansteigen.

Unter diesen Aspekten und den langfristigen ökologischen Vorteilen sollte auf die Wahl eines Brennwertkessels verzichtet werden und ein Warmwasserspeicher in das Nahwärmenetz integriert werden. Dabei können die Investitionskosten durch Wahl eines kleineren Speichers oder einer anderen Technologie gegebenenfalls noch sinken.

## 8 Fazit und Zukunftsaussichten

Das Ziel dieser Bachelorarbeit bestand darin, die Heizungstechnik in einem Bestandsgebäude so anzupassen, dass eine möglichst effiziente Nutzung der Abwärme einer geplanten Kälteanlage (Frosterei) möglich wird. Die größten Herausforderungen waren dabei die Datenbereitstellung und der Modellaufbau, da nur wenige Gebäude und Erzeugerdaten bekannt waren.

Nachdem eine Einführung in die übliche Heizungstechnik erfolgte, wurden die für die Ermittlung des Primär- und Endenergiebedarfs des Gebäudes und für die Simulation benötigten Daten durch die Untersuchung des Bestandsgebäudes ermittelt.

Die Untersuchung ergab, dass eine unzureichende Dämmung und veraltete Heizungstechnik zu einem hohen Heizwärmebedarf und Ölverbrauch führen. Allein durch die Dämmung des Daches könnte der Heizwärmebedarf um bis zu 20% reduziert werden. Sollte allerdings eine ausreichende Abwärme der Frosterei als Nahwärme zur Verfügung stehen, ist die Dämmung der Mitarbeiterunterkunft aus wirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll.

Durch die niedrigen Vorlauftemperaturen stellte sich heraus, dass die Wahl einer Fußbodenheizung und Niedertemperaturradiatoren als Heizelemente, sowie einer Luft-Wasser-Wärmepumpe und einem elektrischen Heizelement als Wärmeerzeuger für die Modellbildung am besten geeignet sind. Aus den gewählten Heizungskomponenten wurden die beiden Modelle „Direkte Nutzung der Nahwärme“ und „Luft-Wasser-Wärmepumpe“ erstellt. Aus diesen Modellen wurden insgesamt zwölf unterschiedliche Varianten in Abhängigkeit des geringsten Stromverbrauchs und der strikten Temperaturhaltung des Gebäudes wie auch des Warmwassers entworfen. Die Ergebnisse der zwölf Varianten wurden miteinander verglichen und nach Stromverbrauch, Wirtschaftlichkeit und menschlichem Wohlbefinden bewertet.

Die Untersuchung der Luftfeuchtigkeit und der Temperatur des Gebäudes zeigte, dass die Differenzen zwischen allen zwölf Varianten so gering sind, dass die Wirkung auf das menschliche Wohlbefinden vernachlässigt werden kann. Die Ergebnisse der Simulation zeigten weiterhin, dass sich trotz der zusätzlich notwendigen erzeugerseitigen Wärmepumpe die Varianten mit Nutzung des höchsten

Temperaturniveaus als am effizientesten herausstellten. Vor allem die Wahl der Variante *L-W 9* stellte sich als äußerst wirtschaftlich heraus, da sich die notwendigen Anfangsinvestitionskosten bereits nach sieben Jahren amortisiert hätten. In direkter Konkurrenz zu *L-W 9* steht die Variante *Direkt 3* mit einer Amortisationszeit von neun Jahren. Weiterhin ist die Verwendung einer Fußbodenheizung bei dieser Variante für das menschliche Wohlbefinden angenehmer als die Verwendung von Niedertemperaturradiatoren. In dieser Thesis wird trotzdem die Variante *L-W 9* favorisiert, da die Investitionskosten günstiger ausfallen und die Installation einer Fußbodenheizung im Bestandsgebäude mehr Probleme und Einschränkungen mit sich bringen kann, als die von Niedertemperaturradiatoren.

Damit ein Ausfall der Nahwärme oder eine Betriebspause keine negativen Auswirkungen auf das Wohlbefinden und die Gebäudesubstanz hat, sollte die Möglichkeit geprüft werden, einen saisonalen Wärmespeicher in das Nahwärmenetz zu integrieren. Die Wahl eines zusätzlichen Heizkessels oder eines BHKWs zur Wärmeerzeugung sollte aufgrund der zu erwartenden geringen Betriebszeit und der damit verbundenen Effizienzminderung nicht in Betracht gezogen werden. Die hohen Investitionskosten eines Wärmespeichers sollten unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit betrachtet und als Investition in eine grünere Zukunft gesehen werden.

In der Gesamtbetrachtung wird die Nutzung der Abwärme von den Kälteanlagen der Gemüsefrosterei zur Raumbeheizung und Trinkwarmwassererhitzung als eine sinnvolle und zukunftsorientierte Investition gesehen.

In einem weiteren Schritt könnte die Simulation auf weitere für einen Anschluss an ein Nahwärmenetz geeignete Gebäude des Ortes ausgeweitet werden. Weiterhin könnte ein saisonaler Wärmespeicher und gegebenenfalls weitere regenerative Energien zum Einsatz kommen.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] J. Bonin, Handbuch Wärmepumpen - Planung und Projektierung (3. Auflage), Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2017.
- [2] D. Korn, Effizienter Betrieb von Kälteanlagen (11. Auflage), Berlin: VDE Verlag, 2017.
- [3] C. Rechenauer, W. Pistohl und B. Scheuerer, Handbuch der Gebäudetechnik Planungsgrundlagen und Beispiele (9. Auflage, Band 2), Köln: Bundesanzeiger Verlag GmbH, 2016.
- [4] K. Langheinecke, P. Jany und G. Thieleke, Thermodynamik für Ingenieure (6. Auflage), Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag, 2006.
- [5] H. Stöcker, Taschenbuch der Physik (6. Auflage), Frankfurt am Main: Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch, 2010.
- [6] C. Pöhn, A. Pech und T. Bednar, Bauphysik - Erweiterung 1: Energieeinsparung und Wärmeschutz. Energieausweis - Gesamtenergieeffizienz (2. Auflage), Wien: Springer-Verlag, 2012.
- [7] J. Krimmling, Energieeffiziente Nahwärmesysteme - Grundwissen, Auslegung, Technik für Energieberater und Planer, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2011.
- [8] P. Von Böckh und T. Wetzel, Wärmeübertragung - Grundlagen und Praxis (5. Auflage), Berlin: Springer-Verlag, 2014.
- [9] P. Hermann, „Konstantheizkessel,“ 30 08 2016. [Online]. Verfügbar: <https://heizung.de/oelheizung/wissen/konstantheizkessel-veralteter-standard-in-oelheizungen/>. [Zugriff am 04 07 2018].
- [10] W. Richter, „Problemfall Stufen,“ 14 05 2018. [Online]. Verfügbar: <https://www.planet-wissen.de/technik/energie/erdwaerme/pwieproblemfall-staufen100.html> . [Zugriff am 24 07 2018].

- [11] Z. M. f. d. Gemüsefrosterie, Interviewpartner, *Daten zur Mitarbeiterunterkunft und der Gemüsefrosterie*. [Interview]. 2018.
- [12] K.-J. Albers, Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik Band 1+2 (78. Auflage), München: Deutscher Industrieverlag GmbH, 2017.
- [13] U. u. s. Bundesamt, „Wassernutzung privater Haushalte,“ 29 04 2016. [Online]. Verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/wassernutzung-privater-haushalte>. [Zugriff am 19 06 2017].
- [14] B. d. D. H. I. N. 60, „Warmwasserspeicher - Energielabel und Ökodesign-Anforderungen,“ 2015. [Online]. Verfügbar: <https://www.bdh-koeln.de/fachleute/publikationen/infoblaetter.html>. [Zugriff am 02 08 2018].
- [15] R. Rothmann, „Senkung der Zirkulationsverluste in zentralen Trinkwassererwärmungsanlagen,“ 2015. [Online]. Verfügbar: [https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/iet/gewv/forschung/forschungsprojekte/alte\\_projekte/copy\\_of\\_zirkulation](https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/iet/gewv/forschung/forschungsprojekte/alte_projekte/copy_of_zirkulation). [Zugriff am 02 08 2018].
- [16] T. Kistemann, W. Schulte und K. Rudat, Gebäudetechnik für Trinkwasser (2. Auflage), Berlin: Springer-Verlag, 2017.
- [17] D. Koch, „Langzeit-Entwicklung der Bodentemperaturen in verschiedenen Naturräumen Nordrhein-Westfalens,“ 2010. [Online]. Verfügbar: <https://www.lanuv.nrw.de/kfm-indikatoren/index.php?indikator=11&aufzu=4&mode=indi>.
- [18] V. D. Ingenieure, Wärmeschutzverordnung - Neues Denken in der Gebäudetechnik, Düsseldorf: VDI Verlag, 1994.
- [19] V. S. AG, „Polysun Simulation Software,“ 2018. [Online]. Verfügbar: <http://www.velasolaris.com/>. [Zugriff am 22 08 2018].
- [20] H. Veith und D. Schmidt, Grundkurs Kältetechnik (11. Auflage), Berlin: VDE Verlag, 2017.

- [21] W. Wagner, Rohrleitungstechnik (10. Auflage), Würzburg: Vogel Fachbücher, 2008.
- [22] H. Ekbert und B. Schröder, Wärmeschutz und Heizungstechnik, Wiesbaden: 2014, 2014.
- [23] Statista, „Durchschnittlicher Verbraucherpreis für leichtes Heizöl in Deutschland in den Jahren 1960 bis 2018,“ 2018. [Online]. Verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2633/umfrage/entwicklung-des-verbraucherpreises-fuer-leichtes-heizoel-seit-1960/>. [Zugriff am 13 08 2018].
- [24] Statista, „Strompreise\* für Haushaltskunden in Deutschland in den Jahren 2007 bis 2017,“ 2018. [Online]. Verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/154908/umfrage/strompreise-fuer-haushaltskunden-seit-2006/>. [Zugriff am 13 08 2018].
- [25] A. Hauer, S. Hiebler und M. Reuß, Wärmespeicher, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2013.
- [26] Statista, „Entwicklung der Gaspreise\* für Haushaltskunden in Deutschland in den Jahren 2007 bis 2017,“ 2018. [Online]. Verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/168286/umfrage/entwicklung-der-gaspreise-fuer-haushaltskunden-seit-2006/>. [Zugriff am 16 08 2018].



## **Anhang**

Der Anhang befindet sich auf der beigelegten CD und kann bei dem Erstprüfer Prof. Dr. Gräßner eingesehen werden. Die folgenden Dokumente sind im PDF-Format abgespeichert. Die Reihenfolge der gespeicherten Daten entspricht der folgenden Gliederung

### 6. Simulationsdatei, Reports und Polysun-Benutzerhandbuch

- 6.1 Simulationsdatei von Polysun
- 6.2.X Kurzreports aller zwölf Polysun-Varianten
- 6.3 Hinweise zu den Reports
- 6.4 Benutzerhandbuch von Polysun

### 7. Datenblätter

- 7.1 Datenblatt der erzeugerseitigen Wärmepumpe der Firma Viessmann
- 7.2 Datenblatt des Blockheizkraftwerks der Firma Sokratherm
- 7.3 Datenblatt des Brennwertkessels der Firma Viessmann

### 8. Bachelorarbeit