

energiepalingen e.V.

-

-

23923 Palingen (Lüdersdorf)

Endbericht

zur Voruntersuchung für ein kaltes Nahwärmenetz in Palingen



Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	3
Abstract.....	4
Einführung und Zielstellung.....	5
Herangehensweise und Methodik.....	7
Vorstudie: Erfassung der Gebäude.....	8
Netzstudie.....	11
Wärmenetz im Ist-Zustand.....	11
Topologie.....	11
Netzoptimierung und Parameter.....	12
Wärmenetz im optimierten Zustand.....	15
Auswertung.....	17
Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit.....	21
Weitere Aspekte und nächste Schritte.....	24
Zusammenfassung.....	25
Anhang.....	26

Abkürzungsverzeichnis

MFH	Mehrfamilienhaus
BHKW	Blockheizkraftwerk
COP	Coefficient Of Performance
CPC	Compound Parabolic Concentrator
DLE	Durchlauferhitzer
EEG	Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien
FBH	Fußbodenheizung
HWW	Heizwarmwasser
JAZ	Jahresarbeitszahl – gewichtete Summe aller COP einer Maschine
LWP	Luft-Wasser-Wärmepumpe
OGD	Oberste Geschossdecke
PVA	Photovoltaik-Anlagen
RL	Rücklauf
RltA	Raumluftheizungsanlage
ST	Solarthermie
SWP	Sole-Wasser-Wärmepumpe
TWW	Trinkwarmwasser
VL	Vorlauf
WE	Wohneinheiten

Abstract

Mit dieser Voruntersuchung wurde gezeigt, dass ein kaltes Nahwärmenetz für die 11 Gebäude im Unterdorf von Palingen technisch und wirtschaftlich umsetzbar ist. Die detaillierte Analyse des Gebäudebestands ergibt einen realistischen Heizleistungsbedarf von 115 kW im Ist-Zustand. Die Simulation des Netzes bestätigt, dass mit einer zentralen Luft-Wasser-Großwärmepumpe in Kombination mit einem Pufferspeicher von mindesten 30 m³ und mit dezentralen Booster-Wärmepumpen bei jedem Gebäude eine hohe Effizienz, geringe Verteilungsverluste und eine robuste Versorgungssicherheit gewährleistet wird. Durch gezielte Sanierungsmaßnahmen lässt sich die Heizleistung auf 101 kW reduzieren. Dies verbessert die Netzperformance und senkt die Investitions- und Betriebskosten.

Durch nutzbare Förderprogramme lässt sich ein wettbewerbsfähiger Warmegestehungspreis von 7,7 bis 8,9 ct/kWh erreichen. Damit ist der Wärmepreis deutlich günstiger als aktuelle und voraussichtlich zukünftig steigende Preise für eine Wärmeversorgung mit Gasverbrennung oder BHKW. Das Projekt bietet damit eine nachhaltige, stabile Wärmeversorgung und stellt einen wichtigen Schritt zur lokalen Energiewende in Palingen dar.

Einführung und Zielstellung

Bei kalter Nahwärme, auch Anergienetze oder Wärmenetze der 5. Generation (engl.: 5th Generation District Heating & Cooling - 5GDHC) genannt, handelt es sich um eine Wärmeversorgung, die bisher wenig verbreitet ist, jedoch ein großes Potenzial zur Dekarbonisierung der Wärmesysteme in kleinen wie großen Dimensionen mit sich bringt. Im Gegensatz zu konventionellen Wärmenetzen bzw. Heißwärmenetzen, wird das Wasser in den Netzleitungen auf niedrigen Temperaturen von 5 °C bis 25 °C verteilt, nimmt dabei Umweltenergie bzw. -wärme auf. Eine zentrale Wärmepumpe, die Umweltwärme aus Wasser, Erde oder Luft nutzt, sorgt für eine Mindesttemperatur in dem Pufferspeicher, siehe Abbildung 1 links. Erst in den angeschlossenen Gebäuden wird mittels einer dezentralen Wasser-Wärmepumpe die notwendige Vorlauftemperatur für die Beheizung des Gebäudes erzeugt. Wird das Netz unterhalb der Temperatur des Erdbodens betrieben hat man Wärmegewinne über die Leitungen anstatt von Leitungsverlusten. So erspart man sich zusätzlich die teure Verlegung von gedämmten Rohren. Auf Grund der niedrigen Temperaturspreizung zwischen Umweltwärme und Leitungswärme ist eine Wärmepumpe, die die Netztemperatur liefert, besonders effizient. In Kombination mit erneuerbaren Energien sinken die Treibhausgasemissionen auf ein Minimum. In Europa finden sich kalte Wärmenetze vor allem in Deutschland, Dänemark und Schweden¹. In einer Studie der RWTH Aachen wurden 53 Wärmenetze der 5. Generation in Deutschland untersucht. Die Größe reicht von 4 bis zu 417 Gebäuden².

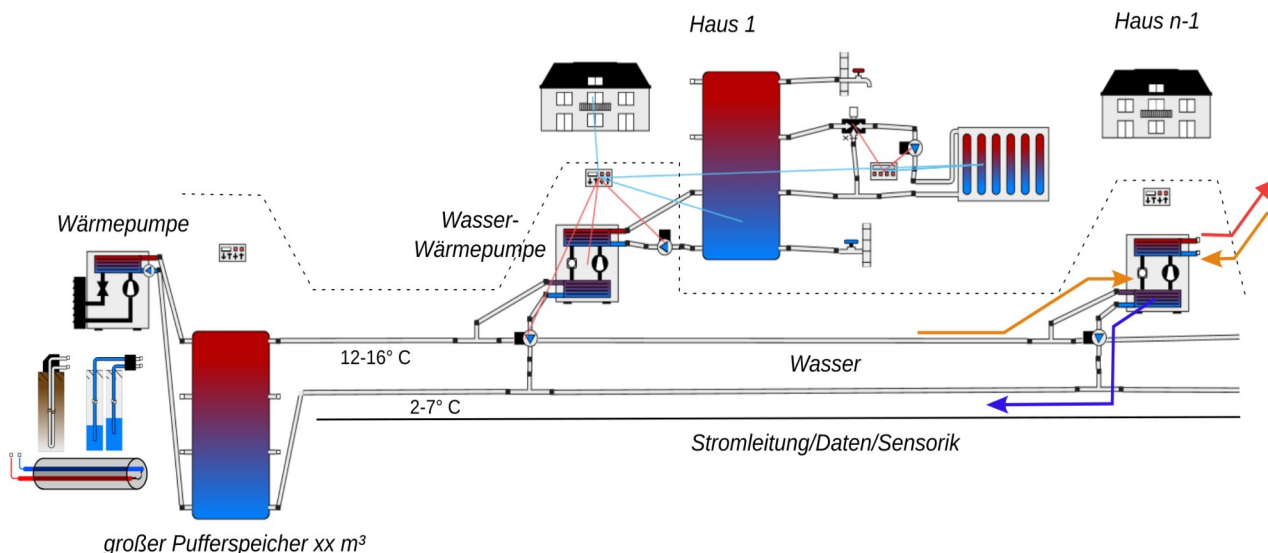


Abbildung 1: Prinzip eines kalten Nahwärmenetzes

Mit dem Ziel einer treibhausgasneutralen und von fossilen Energien unabhängigen Wärmeversorgung vor Augen machen sich einzelne Haushalte, kleine und große Gemeinschaften, Kommunen und in langsamen Schritten auch die Politik auf den Weg. So hat sich im Unterdorf von Palingen der Verein energiepalingen e.V. gegründet und stellt sich der Herausforderung, eine eigene nachhaltige und fortschrittliche die Wärmelösung für sich zu finden. Palingen ist ein Ortsteil der Gemeinde Lüdersdorf in Mecklenburg-

- 1 Low Temperature District Heating as a Key Technology for a Successful Integration of Renewable Heat Sources in our Energy Systems; Dietrich Schmidt and Kristina Lygnerud 2021; Fraunhofer Institute for Energy Economics and Energy System Technology IEE, Kassel (Germany) and IVL Swedish Environmental Research Institute, Gothenburg (Sweden); <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.079>
- 2 Survey of 53 Fifth-Generation District Heating and Cooling (5GDHC) Networks in Germany; by Marco Wirtz, Thomas Schreiber, Dirk Müller 2022; <https://doi.org/10.1002/ente.202200749>

Vorpommern an der Grenze zu und liegt ca. 30 km entfernt im Landesinneren von der Lübecker Bucht der Ostsee entfernt.

Als Planungsbüro haben wir den Auftrag bekommen für 11 Gebäude im Unterdorf von Palingen eine Voruntersuchung für die Machbarkeit eines kalten Nahwärmenetzes durchzuführen. Vorab dieser Studie wurden die Gebäudedaten in einer separaten Untersuchung erhoben. Auf der Basis dieser gründlichen Erfassung des Ist-Zustandes der Gebäude soll nun ermittelt werden:

- Prognostizierter Wärmebedarf bei den lokalen Klimabedingungen
- Einzelleistungen und Vorlauftemperaturen der einzelnen Hausanschlüsse
- Elektrische Maximalleistung, Wärmeleistung und Strombedarf
- Netzparameter wie Durchflussmengen, Rohrdurchmesser und -längen, Pufferspeicher
- Wirkung von Optimierungs- bzw. Sanierungsmaßnahmen an allen jeweiligen Gebäuden auf Vorlauftemperatur/ Spitzenlast/ Rohrquerschnitte
- Betrachtung des Nutzen von netzgekoppelten Solarthermieranlagen
- Abschätzung der Investitions- und Betriebskosten
- Abschätzung der CO₂-Einsparungen

Herangehensweise und Methodik

Für die Umsetzung eines effizienten und wirtschaftlichen Wärmenetzes ist eine sorgfältige Erfassung der Gebäude zwingend notwendig. Die Netzauslegung und die Anschlussinfrastruktur hängen entscheidend von den Heizwärmebedarfen bzw. den Wärmeverlusten und der notwendigen Heizleistung der Gebäude ab.

Grundsätzlich sind zu erst die Energieverluste über die Gebäudehülle zu verringern, bevor man den Wärmeerzeuger dimensioniert und erneuert. Dadurch wird sichergestellt, dass die Heiztechnik optimal dimensioniert wird, Investitionskosten zielgerichtet eingesetzt werden und die Betriebskosten dauerhaft gesenkt werden. Dies gilt sowohl Wärmelösungen in einem Einzelhaushalt als auch bei dem Zusammenschluss mehrere Haushalte. Insbesondere bei dem Einsatz von Wärmepumpen ist eine an den Bedarf angepasste Dimensionierung wichtig um die Lebensdauer und die Effizienz zu gewährleisten.

Vorab dieser Studie wurden daher für alle Gebäude Sanierungsfahrpläne nach dem Verfahren der Bundesförderung der Energieberatung für Wohngebäude erstellt. So wurden alle relevanten Außenbauteile erfasst und die Wärmeverluste über die Gebäudehülle bestimmt. Die Besitzer und Besitzerinnen haben darüber hinaus den Mehrwert einer Energieberatung, d.h. sie wurden über die bauphysikalischen Schwachstellen und Energieverluste in ihrem Haus aufgeklärt und haben passende Sanierungsmaßnahmen an die Hand bekommen. Das Vorgehen und die Ergebnisse dieser Vorbetrachtung finden sich im folgenden Kapitel.

Im zweiten Schritt haben die Besitzer und Besitzerinnen darüber entschieden, welche Sanierungsmaßnahmen für sie infrage kommen in Hinblick auf ein effizienteres Wärmenetz.

Als Drittes wurde das kalte Nahwärmenetz auf der Basis des Ist-Zustands und des effizienten Zustands der Gebäude mit der Planungssoftware Polysun simuliert. Das Programm erlaubt eine präzise Simulation der Netzstruktur, der Temperaturverläufe und der Integration verschiedener erneuerbarer Quellen. Dadurch können die Komponenten des Wärmenetzes bedarfsgerecht ausgelegt werden.

Vorstudie: Erfassung der Gebäude

Bei den erfassten Gebäuden handelt es sich um 11 Bestandsbauten mit insgesamt 28 Wohneinheiten (WE). Die Gebäude wurden zum Teil im 19. Jh. errichtet und stehen unter Denkmalschutz. Zum Teil gibt es Gebäude die vor 10 bis 20 Jahren errichtet wurden und somit ganz andere energetische Voraussetzungen mit sich bringen.

Zur Erfassung der Gebäudehüllen wurde bei allen Gebäuden eine Begehung durchgeführt. Dabei wurden alle Außenbauteile (oberer Gebäudeabschluss, Außenwände, Fenster und unterer Gebäudeabschluss) auf ihren Bauteilaufbau untersucht. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Aufnahme einzelner Bauteilaufbauten:



Außenwand: Vorsatzschale mit Fachwerk, dahinter Porotonstein



Außenwand: Abschätzung der Dicke des zweischaliges Mauerwerk



Dach: Dämmung der obersten Geschossdecke mit Zellulose



Dach: Überprüfung, ob vor der Dachdämmung eine luftdichte Ebene vorliegt, aufgrund lückenhafter Baubeschreibung



Fußboden: Untersuchung des Aufbaus der Holzbalkenkonstruktion



Heizkörper: Ausmessen fehlender Heizkörpermaße

Zusammen mit den vorgelegten Grundrissen und Baubeschreibungen wurden in der Hottgenroth-Energieberater-Software die Gebäude digital erfasst. In der Software erstellt man ein 3D-Modell von jedem Gebäude mit ihren Außenbauteilen, den jeweiligen Bauteilaufbauten und Wärmedurchgangskoeffizienten. Abbildungen 2 und 3 zeigen das Modell und das beheizte Volumen des MFH-1. Daraus wird die Hüllfläche des Gebäudes berechnet und die Transmissionswärmeverluste des gesamten Gebäudes bestimmt. Der Heizwärmebedarf Q_h ergibt sich aus den Transmissionswärmeverlusten, den Lüftungswärmeverlusten, die sich aus der angenommenen Luftvolumenstrom ergeben, und den solaren bzw. inneren Wärmegewinnen.

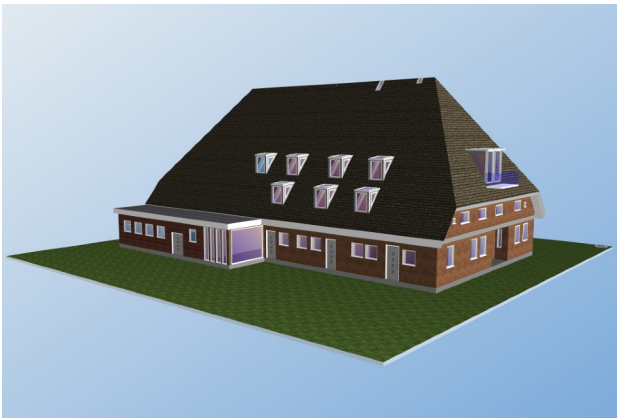


Abbildung 2: 3D-Modell vom Gebäude MFH-1 in Hottgenroth

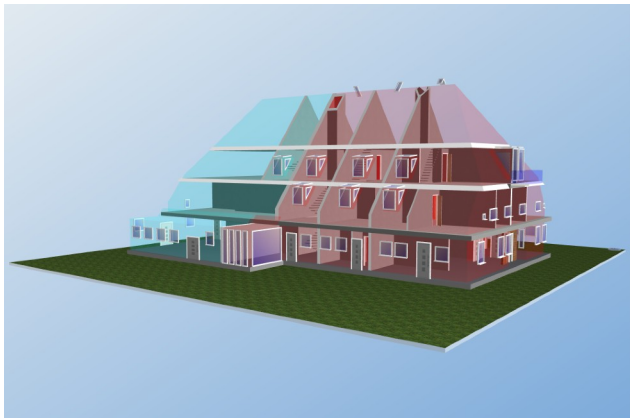


Abbildung 3: Beheiztes Volumen vom Gebäude MFH-1 in Hottgenroth

Anschließend werden die Daten zur Anlagentechnik eingegeben, woraus unter anderem die erforderliche Heizleistung P_{th} und der Trinkwarmwasserbedarf (TWW) nach den Vorgaben der DIN V 18599 bestimmt wird. Zur Simulation des Heizsystems benötigt Polysun die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste, die solaren bzw. inneren Wärmegewinne und die installierte Heizkörperleistung. In Tabelle 1 sind die Wärmeverbräuche, Bedarfe und Leistungen dargestellt.

Tabelle 1: Vergleich der Energiekennzahlen

Gebäude	Mittlerer Wärmever- brauch ³ [MWh/a]	TWW [MWh/a]	Q _h nach DIN V 18599 [MWh/a]	Q _h nach Polysun [MWh/a]	P _{th,installiert} [kW]	P _{th} nach DIN V 18599 [kW]	P _{th} nach Polysun [kW]	VL/RL [°C] @ -11 °C
MFH-1	54,2	14,3	14,2	22,4	40,8	51,4	10,5	32/27/21
MFH-2	59,6	9,8	46,3	46,3	103	49,7	19,2	33/27/21
MFH-2 Geb.2		3	10,6	10,8	25	10	4,2	(27)/25/22
MFH-2 Geb.3 ⁴			9,8	9,7			3,5	29/25
Haus-1	22,8	2,8	29,4	26,1	11,7	26,7	11,4	53/43
Haus-2	5,9 + Holz	2,2	9	8,5	8,7	20	4,1	35/30
Haus-3	50 + Holz	2,8	63,3	62,7	19,3	38	24,2	55/42
Haus-4	29,3	2,8	31,4	32,7	20,1	18	13,8	35/30/27
Haus-5	28,7 + Holz	2,8	43,3	41,5	13,6	37	17,5	48/46 //
								33/30
Haus-6	5,1 + Holz	2	8,6	8,6	15,3	16,7	3,4	24/22
Haus-7	6,1	2,2	8,6	7	7,6	15,7	3,2	35/29
Gesamt	261,7 + Holz	44,7	274,4	278,4	265,1	283,2	115	

Der berechnete Heizwärmebedarf unterscheidet sich um etwa 10 % (Fehlertoleranz durch verschiedene Berechnungsansätze und Steuerung eines Systems). Die berechnete Heizleistung nach DIN V 18599 ist dagegen mit 283,2 kW um mehr als 100 % höher als nach der Simulation mit 115 kW. Dieser Unterschied ergibt sich aus der Randbedingungen, die mit der DIN-Norm angenommen werden. Die Simulation spiegelt dagegen das tatsächliche Nutzungsprofil und die gegebenen Klimabedingungen. Die installierte Leistung liegt bei 265,1 kW und ist damit für den tatsächlichen Bedarf stark überdimensioniert.

Den größten Heizwärmebedarf mit $Q_h \approx 65$ MWh/a und der größten notwendigen Heizleistung (nach Polysun) mit $P_{th} \approx 25$ kW benötigen MFH-2 (MFH-2, Summe von Gebäude 1 bis Gebäude 3) und das Gebäude: Haus 3. Den niedrigsten Energiebedarf und benötigte Heizleistung hat das Gebäude Haus 6. Alle weiteren Gebäude verteilen sich dazwischen. Der energetische Standard ist in vielen Gebäuden bereits gut bis sehr gut durch Dämmebenen in allen Außenbauteilen. Die größten Energieverluste gehen daher auf einen großen Anteil an Lüftungswärmeverlusten von 30-50 % in allen Gebäuden (außer MFH-2 Gebäude 1 und 2 und Haus 6, die über eine raumlufthechnische Anlage verfügen) und auf Anlagenverluste von 30 % zurück. Die Anlagenverluste sind mehrheitlich ineffizienten Gasheizungen geschuldet, die in fast allen Haushalten verbaut sind. Dazu kommen Ineffizienzen bei der Verteilung und der Bereitstellung (Pumpeneinstellung zur Zirkulation, Dämmung der Rohrleitungen). In vielen Gebäuden sind ausreichend Heizkörper und zum Teil auch Fußbodenheizungen verbaut, sodass die Gebäude mit einer niedrigen Vorlauf(VL)-Temperatur von 25-30 °C beheizt werden können. Lediglich die beiden Gebäude Haus 1 und Haus 3 benötigen eine höhere Vorlauf-Temperatur von bis zu 48-53 °C. Dies wirkt sich maßgeblich auf die Effizienz eines Wärmenetzes aus. Daher ist anhand dessen bereits absehbar, dass die Netz stark davon profitiert, wenn in diesen Gebäude die Heizkörper und damit die Heizkörperleistung erweitert werden.

³ Gemittelter Wärmeverbrauch über mindestens 3 Jahre

⁴ Gebäude 3 des MFH-2 wird zukünftig ausgebaut. Verbrauch und installierte Heizleistung liegen daher nicht vor.

Netzstudie

Wärmenetz im Ist-Zustand

Es wurde von einer grundlegenden Struktur des Wärmenetzes ausgegangen. Eine große Luft-Wasser-Wärmepumpe (LWP) speist einen Pufferspeicher für die notwendige Vorlauftemperatur von 2 °C bis 10 °C im Netz. Das Netz beziehungsweise die Leitungen zu den Haushalten dienen somit zusätzlich zur Verteilung als Erdkollektor, sodass auf dem Weg zu den Verbrauchern zusätzlich Wärme aus der Erde entnommen wird, siehe Abbildung 4. An den Gebäuden liefern sogenannte Booster-Wasser-Wasser-Wärmepumpen die notwendige Vorlauftemperatur für das Beheizen jedes Gebäudes. Die Rücklauftemperatur liegt bei 4 °C bis 20 °C. Die normale Temperaturspreizung des Kreislaufs liegt bei 2 bis 3 K.

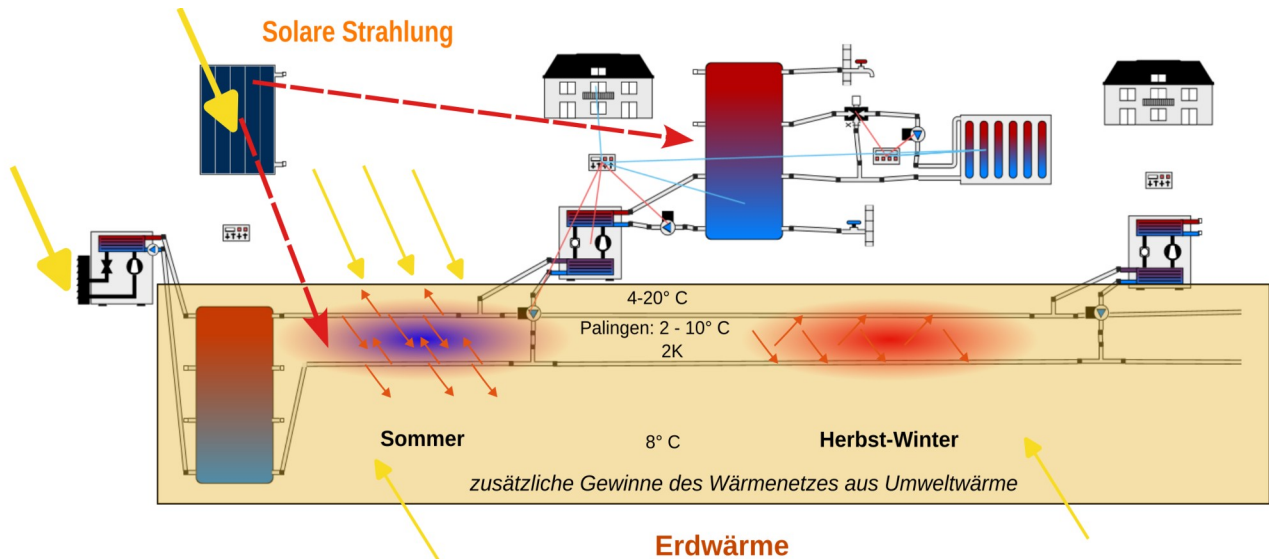


Abbildung 4: Prinzip kaltes Nahwärmenetz Palingen

Mit einem warm-gemäßigten Klima liegt die mittlere Temperatur der nahegelegenen Stadt Lübeck bei 9,6 °C. Der kälteste Monat ist der Januar, wobei im Schnitt Mindesttemperatur von -2 °C erreicht werden⁵. Für die maximale Heizlast wird von einer minimalen Temperatur von -10 °C (15-17.1.xx) ausgegangen. Die Datenbasis ist MeteoSat 6 (h-Basis).

Topologie

Ein Großteil der Gebäude befindet sich nah an der Hauptstraße in Palingen. In Abbildung 5 ist ein Entwurf des Leitungsnetzes mit den entsprechenden Abständen zu sehen. Die Gebäude sind in Graustufen eingezeichnet – je nach Wärmebedarf (hoch=dunkler). Blaue Flächen markieren installierte Photovoltaik-Anlagen und gelbe Flächen markieren (auch geplante) Solarthermieranlagen. Von der 275 m langen Hauptleitungen gehen 5 Stichleitungen zu den Gebäude und eine Astleitung zu den drei Gebäuden, die von der Hauptstraße abgehen. Die geschätzte Gesamtlänge der Leitungen liegt bei 515 m. Die zwei Gebäude im Westen des Netzes liegen mit etwa 21 Höhenmeter ü.N. etwa 5 m höher, als die restlichen Gebäude⁶. Die Netzentenden wurden so gedacht, dass das Netz ost- und westwärts einfach zu erweitern ist.

Der Standort der Großwärmepumpe wurde nahe der Astleitung angenommen, hauptsächlich weil dort bereits ein öffentlicher Anschlusspunkt (ein Netzanschluss mit einer 32-A-Säule ist dabei vollkommen ausreichend) und genügend Platz für einen 10-ft-Container (für Leitzentrale, Vorpufferspeicher, Hydraulik

⁵ Siehe <https://de.climate-data.org/europa/deutschland/schleswig-holstein/luebeck-148/>

⁶ Siehe <https://hoehendaten.de/>

und Elektroverteilung) vorliegt. Nach Simulation wird an dem Platz ein Pufferspeicher mit einem Volumen von mindestens 30 m³ benötigt.

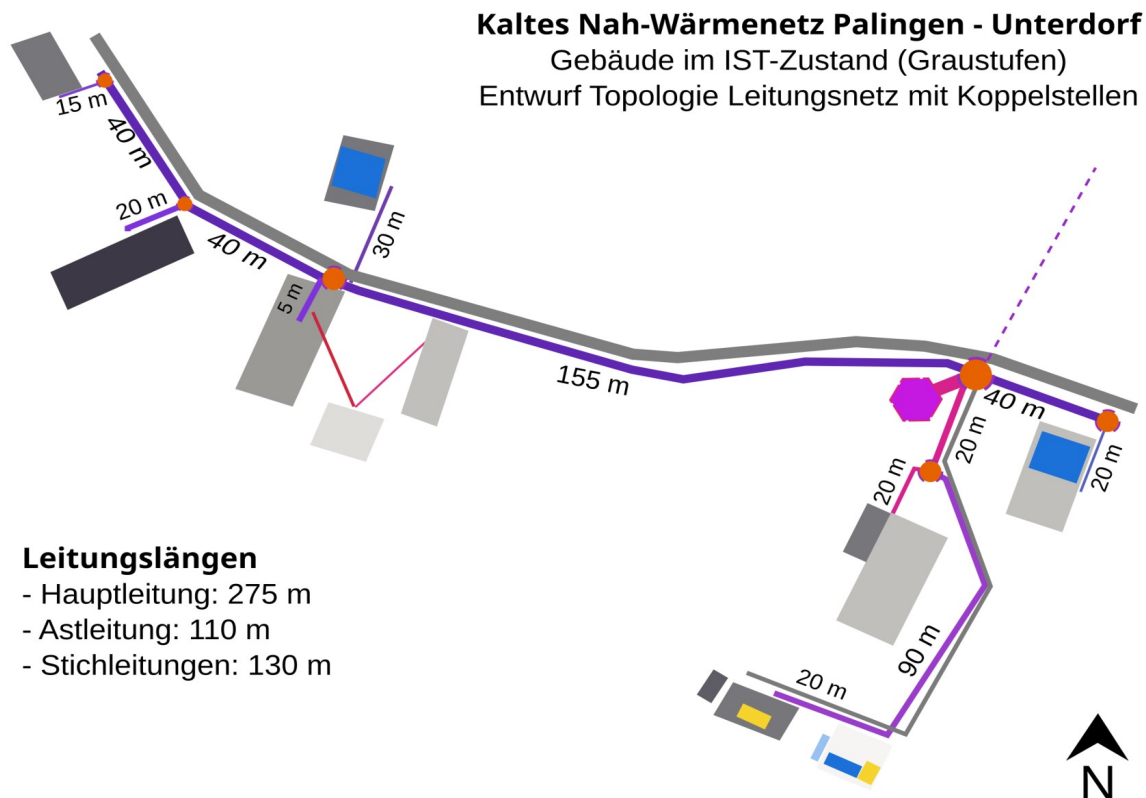


Abbildung 5: Entwurf des Leitungsnetzes

Netzoptimierung und Parameter

Im nächsten Schritt der Simulation wurden die Einzelhaushalte optimiert und die folgenden Annahmen getroffen. Die Hydraulik wurde stark vereinfacht, in dem die Trinkwarmwasserversorgung entfernt wurde. Die Auslagerung der TWW-Versorgung erfolgt zentralisiert am Netz, um Vorlauftemperatur, Netzleistung, Energiebilanz und Solarthermie-Nutzung einzugrenzen. Die Leistungen des Heizungssystem wurden nach Heizkreisen und mit Wasser-Wasser-Wärmepumpen getestet. Ziel ist die Ermittlung der Vorlauf- und Rücklauftemperaturen, um in der kältesten Woche die Raumtemperatur von 20 °C (± 1 K) im gesamten Gebäude sicherzustellen. Als Ergebnis wurde daraus ermittelt, dass die aktuelle Heizleistung dabei nicht in allen Gebäuden ausreicht. Damit ein hoher bzw. effizienter COP erreicht werden kann, wird daher als eine Maßnahme vorgeschlagen in den betreffenden Gebäude die Heizleistung entsprechend zu erhöhen. Für die Haushalte Haus 1 wurde eine Zusammenfassung der Wärmepumpe mit Haus 6 erwogen, um Kosten zu sparen und einen effizienten Betrieb anzustreben. Gleiches wurde auch auf die Doppelhaushälften Haus 2 und Haus 7 mit jetzt jeweils einer 20 kW Gastherme auf eine 8 kW-Wärmepumpe substituiert. Ebenso wurden die zwei Bestandsgebäude und der Zubau des MFH-2 zusammengefasst, da diese in einem Extraauftrag einer detaillierte Optimierung untersucht werden. So wurde gewährleistet, dass die Simulation nicht an ihrer Grenzen kommt.

Zum ersten Aufbau der Simulation und als Vorbetrachtung wurde das Netz in ein Ostsegment (rechts der Wärmepumpe in Abb. 5) und Westsegment (links der Wärmepumpe in Abb. 5) zerlegt angelegt, um das Wärmenetz- und Einzelgebäudeverhalten zu testen. In Tabelle 2 sind die Netzparameter für die

Netzsegmente zusammengefasst dargestellt. Diese erste Annäherung ist nicht der IST-Zustand, sondern soll die Herangehensweise beschreiben.

Tabelle 2: Netzparameter im IST-Zustand als erste Simulationsverifikation durch Netzsegmente

	West-Netz	Ost-Netz
Volumenstrom [m³/h]	23,43	10,91
Maximale Druckdifferenz [bar]	1,4	0,4
Druckverluste [kPa]	60 (worst-case), 6 kPa (normal)	2 kPa (normal)
Temperatur-Spreizung [K]	2	2
Heizwärmebedarf [MWh/a]	163	66
Q _h LWP [MWh/a]	83	33
E _{el} LWP [MWh/a]	17,4	8
E _{el} BoosterWP [MWh/a]	36	12
Leitungsgewinne [MWh/a]	7,1	18
COP - Gesamtsystem	3,1	3,2

Anschließend wurden die einzelnen Netzsegmente zusammengeführt und die Netzparameter ermittelt.

Für das Netz im Ist-Zustand (sowie im OPT-Zustand, siehe nächstes Kapitel) wurde nicht davon ausgegangen, dass Holz weiter verbrannt wird. Nach neuesten Bewertungen des UBA2024 wird Scheitholz (Kiefer) mit 0,404 kg CO₂/kWh⁷ bemessen und hat damit einen doppelt so hohen Emissionsfaktor wie Erdgas. Neben der massiven Feinstaubbelastung ist Holz keine nachhaltige Lösung zur Wärmeerzeugung. Darüber hinaus ist nicht davon auszugehen, dass insbesondere ältere oder gesundheitlich beeinträchtigte Menschen den körperlichen und logistischen Aufwand nicht leisten können. Es ist somit keine dauerhafte Option ein Haus für diesen Mehraufwand zu bemessen.

Es wurden zwei Solarthermie-Anlagen (CPC) mit 50° Süd angenommen, um die höchsten Netzgewinne und Leistung zu ermöglichen. Der Überschuss nach den Haushalten wird mit einem Bypass direkt in das Wärmenetz eingespeist. Solch eine Anlage (CPC) ist hochwirtschaftlich, senkt die zu installierende Spitzenleistung, erhöht den wirtschaftlichen Betrieb der Wärmepumpen und verlängert deren Lebensdauer. Dabei konnte grob abgeschätzt werden, dass bis mindestens 60 m² CPC mit optimaler Ausrichtung einen 100% Nutzungsgrad aufweist und somit einen sehr guten Wärmepreis ermöglicht.

Es wurde angenommen, dass das Netz mit einem DN80/76 PE-Rohr in 1,5 m Tiefe eingeschossen wird. Die zugrunde gelegten Bohrrdaten aus der Umgebung liefern als Bodenwerte sehr günstige Rahmenbedingungen:

- Geschiebemergel mit hohem sandigen Anteil bis ca. 1,5 - 2 m Tiefe
- Bodenfeuchte von ca. 15 % bei 8 - 12 °C
- Wirkungsbereich mit einem Radius von 50 cm (Simulationsmaximum)
- Dichte: 1900 kg/m³ (Annahme eines Schätzwertes aus der Simulationsdatenbank)
- Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,5 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ (Schätzwertes aus der Simulationsdatenbank)
- Spezifische Wärmekapazität: $c_p = 0,789 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ (Schätzwertes aus der Simulationsdatenbank)

Nach Recherche kann für Erdraketentechnik und Rohr auf 15 m Abschnitten ein Preis von durchschnittlich 30 €/lfm angenommen werden. Es werden so gut 12 Verbindungsstücke á 500 € angenommen und ein Drei-Rohrsystem (Vorlauf-, Rücklauf- und Reserveleitung), wobei die Reserve für Daten und Stromnetz genutzt werden kann. Das Stromnetz wird als Arealnetz betrieben, das den Strom der Haupt-Luftwärmepumpe, Booster-Wärmepumpen, Netzpumpen und Steuerung zusammenfasst. Hierauf können auch (Nicht-

⁷ Siehe: <https://www.umweltbundesamt.de/uba-co2-rechner-neue-berechnungsgrundlage-bei#11warum-wurde-die-berechnung-fur-holzbrennstoffe-im-co2-rechner-angepasst>

EEG-)PV-Anlagen netzdienlich einspeisen (besonders günstige Direktvermarktung im Bilanzkreis möglich). Mit einem Innendurchmesser von 72 mm der PE-Rohre wurden die Durchflussmengen aus den Einzelhaushalten bestimmt. Die Durchflussmengen gilt es auf der einen Seite zu beruhigen, damit nicht im Worst-Case (kältester Tag im Jahr: 16.1.xx) alle Haushalte im Netzabschnitt zu hohe Durchflussmengen und damit Strömungswiderstände verursachen, die die Pumpenleistung und Energiebedarf unnötig erhöhen. Auf der anderen Seite führen geringe Durchflussmengen nach dem Energieerhaltungssatz zu einer größeren Temperaturspreizung zwischen Vorlauf und Rücklauf. Die Spreizung sollte jedoch gering sein, damit die Vorlauftemperatur der Luftwärmepumpe gering bleibt (sehr COP-relevant), mehr thermische Gewinne aus dem Boden genutzt werden können, das reine Wasser-System fern dem Gefrierpunkt arbeitet und ein thermischer Kurzschluss zwischen Vorlauf und Rücklauf gering bleibt. Daher ist für Letzteres ein Abstand von ca. 1 m vorgesehen. Üblicherweise wird für kalte Nahwärmenetze eine Spreizung von 3 K vorgesehen. Aus diesen Anforderungen galt es einen optimalen Betriebspunkt zu bestimmen. Nach rechnerischer Optimierung erscheint eine Spreizung im Worst-Case-Szenario bei 2 K zu liegen und wurde auf die Einzelverbraucher angewandt. Hieraus ergeben sich sehr moderate Durchflussmengen von 20 m³/h im West- und 10 m³/h im Ostnetz. Mit dem gewählten Durchmesser und der Modulation der WP resultiert dies in einen Strömungswiderstandskoeffizient mit $c_w = 40$, der mit 6 kPa ausgeglichen wird, und einer Spitzenleistung von 60 kPa. Die Druckdifferenz steigt dann bis zum Haushalt Haus 3 auf maximal 1,3 bar an und liegt sonst bei 0,3 bar ohne Höhenzuschlag. Dies führt im gesamten Betriebsbereich zu optimalen Betriebsbedingungen, die bei allen Parametern weiteren Spielraum zulassen, wie eine Verkleinerung des Querschnitts für geringere Bohrkosten, verkleinerte Spreizung für höhere Effizienz und Reserve oder geringere Pumpenleistung. Bis auf den festgelegten Rohrquerschnitt gestattet solch ein System auch noch weitere Teilnehmer am Straßenzug ohne Weiteres aufzunehmen.

Mit den gewählten Parametern, den Wärmesenken und -erzeugern konnte das Mindestvolumen des Pufferspeichers an der Luftwärmepumpe mit 30 m³ bestimmt werden. Dies führt zu einer guten Laufruhe der Luftwärmepumpe. Es gibt ausreichend Reserve zum Abtauen, bei Lastspitzen und Kapazität für die Aufnahme von solarer Wärme (wodurch die Nutzung flexibler Stromtarife attraktiver wird). Der Speicher kann im Erdreich vergraben werden und stört somit nicht im Landschaftsbild. Die Temperatur des Pufferspeichers ist nicht konstant, geht jedoch maximal bis zu 12 °C. Die Stillstandszeit sind 2 Stunden und die minimale Laufzeit bis die maximale Temperatur von 12 °C erreicht wird beträgt 4 Stunden. Ist die minimale Einschaltzeit erreicht, schaltet sich die Wärmepumpe bei 8 °C per Regelung ab.

Der Betriebszustand wurde in der Simulation so gewählt, das die Wärmepumpen in der Zeit von 22 Uhr bis 6 Uhr ruhen. Zum einen ist in dieser Zeit mit niedriger Außenlufttemperatur der COP für die Luftwärmepumpe schlechter. Zum anderen befreit das von den Anforderungen nach TA-Lärm⁸. Wenn in diesem Szenario genügend Energie für die Gebäudeheizung bereitsteht, ist damit auch sichergestellt, dass an deutlich kälteren Tagen sowie für die TWW-Bereitung zusätzlich rund 30 % mehr Wärme zur Verfügung steht.

Der Bedarf für TWW wurde zur Vereinfachung nicht simuliert. Die Leistung der Wärmepumpen ist jedoch für den Worst-Case ausgelegt, was bei Temperaturen über diesem Arbeitsbereich deutlich mehr Leistungen bereit stellt. Es besteht damit kein Mangelfall für die Bereitstellung von TWW in den Haushalten, die ohnehin nur ca. 5 % der Arbeitszeit benötigen.

⁸ Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz)

In Tabelle 3 sind die Parameter für das gesamte Netz im IST-Zustand zu sehen.

Tabelle 3: Netzparameter für den Ist-Zustand

	Wert
Volumenstrom [m³/h]	36
Maximale Druckdifferenz [bar]	1,3
Druckverluste [kPa]	60 (worst-case), 6 kPa (normal) @ PE 80/76
Temperatur-Spreizung [K]	2
Heizwärmebedarf [MWh/a]	278,4 ⁹
Q _h LWP [MWh/a]	47,8 + 126,6 = 174,4
E _{el} LWP [MWh/a]	6,8 + 19 = 25,8
E _{el} BoosterWP [MWh/a]	15,5 + 44,6 = 60,1
Leitungsgewinne [MWh/a]	5,6 + 7,1 = 13
JAZ - Gesamtsystem	3,24 ¹⁰

Die Wärmepumpen der einzelnen Haushalte haben dabei folgende Leistungen:

Tabelle 4: Kennzahlen der Booster-Wärmepumpen

Gebäude	Wärmepumpe	Leistung [kW]	Pufferspeichergroße [l]
MFH-1	GMSW 11 Plus	10,8	1000
MFH-2 Gebäude 1			
MFH-2 Gebäude 2	GMSW 22 Plus	22,6	1500
MFH-2 Gebäude 3			
Haus 1 + Haus 6	GeoTherm VWS 141	14	1000
Haus 2 + Haus 7	HSWP Futura 40	8,6	1000
Haus 3	2 x HSWP Futura 40	8,6	1000
Haus 4	AWE ESW 9/1, B0W35	8,4	750
Haus 5	GMSW 18 Plus	17,2	750

- 9 Der Heizwärmebedarf ist in der Simulation größer, als die tatsächlich bereitgestellte Wärme (hier 229 MWh/a), da in den wärmeren Monaten Heizsysteme früher abschalten (Effizienztest mit Simulationsgrenzen, Nutzerverhalten, systembedingte Trägheit). Heizsysteme sind hier tolerant zu den „Energiedefiziten“ (~50 MWh/a)
- 10 Die Wärmepumpen wurden nach Herstellerangabe der Maximaldrehzahl gewählt. Tendenziell ist die JAZ um 1 im Durchschnitt besser. Es wurden nur LWP und Sole/WP mit dem Kältemittel R290 gewählt. Dadurch ist die Auswahl sehr einschränkt, möglich sind andere natürliche Kältemittel.

Wärmenetz im optimierten Zustand

Teil dieser Untersuchung ist die Betrachtung von Optimierungs- bzw. Sanierungsmaßnahmen an allen Gebäuden und ihre Wirkung auf das kalte Nahwärmenetz mit Hinblick auf die maßgeblichen Parameter wie Vorlauftemperatur, Spitzenlast oder Rohrquerschnitte. Kalte Nahwärmenetze haben den großen Vorteil, gegenüber Mitteltemperatur und Heißnetzen, sehr effizient zu sein. Dies funktioniert jedoch nur, wenn der Wärmebedarf und Leistung sehr gut bekannt sind. Anderenfalls steigen unnötig die Installations- und Betriebskosten und das Risiko eines vorzeitigen Ausfalls oder Unrentabilität. Aus diesem Grund wird hierfür eine möglichst genaue Abbild der Gebäude und Lebenssituation benötigt und umgesetzt. Das ist der OPT-Zustand.

Im Rahmen der Erstellung der individuellen Sanierungsfahrpläne wurden allen Haushalten eine Reihe von Sanierungsmaßnahmen an ihren Häusern vorgeschlagen. Maßgebend für die Auswahl der Maßnahmen sind drei Aspekte:

- Einhaltung der Bauphysik, um das Wohngebäude und die Wohngesundheit zu erhalten (z.B. zum Feuchteschutz)
- Hohes Kosten-Nutzen-Verhältnis: Maßnahmen, die langfristig besonders viel Energie einsparen bei vergleichsweise niedrigen Investitionskosten
- Ökologie: Verwendung nachhaltiger Baustoffe

So gibt es bei mehreren Gebäuden die dringende Empfehlung die Fenster zu tauschen, da diese kaputt sind, was aber hinsichtlich des Energiebedarfs i. d. R. nur eine geringe Einsparung mit sich bringt. Hingegen sind die Maßnahmen Dämmung von Fußböden und Dachgeschoss, Außenwand- bzw. Kerndämmung (eines zweischaligen Mauerwerks, Installation von raumluftheiztechnischen Anlagen (rltA) die genannten Maßnahmen mit hohem Einsparpotenzial und hoher Kosteneffizienz. Für einen hochwertigen Neubau konnten keine sinnvollen energetischen Maßnahmen vorgeschlagen werden, da der Energiebedarf, bis auf den Holzverbrauch, nicht mehr signifikant und wirtschaftlich realistisch war. In der Tabelle 5 soll dargestellt werden, welche Maßnahmen vorgeschlagen wurden und mit welchem Effekt man auf den gesamten Energiebedarf rechnen kann:

Tabelle 5: vorgeschlagene Sanierungsmaßnahmen

Maßnahme	Anzahl der Haushalte, bei denen diese Maßnahme sinnvoll ist	Einsparung am Heizwärmebedarf [MWh]
Dämmung	3	-9,12
Fußboden/Kellerdecken		
Außenwanddämmung	4	-21,56
Fenstertausch	4	-1,52
Dämmung des oberen	1	-11,89
Gebäudeabschluss (OGD /Dach)		
Herstellung der Luftdichtheit (z.B. Fensterdichtungen)	3	-4,38
Raumluftheiztechnische Anlage	7	-49,88
Gesamt		-98,35

Die genannten Maßnahmen waren, bis auf baulich unabdingbare Reparaturen tatsächlich, nicht größer als 15.000 € je Maßnahme und WE. Mit den vorgeschlagenen Maßnahmen würde sich der gesamte Heizwärmebedarf von 278,4 MWh um knapp 100 MWh und damit um etwa 35 % reduzieren. Den größten Anteil macht dabei vor allem die Installation einer raumluftheiztechnischen Anlage in den Gebäuden aus. Die Lüftungsverluste bei reiner Fensterlüftung machen an den Wärmeverlusten insgesamt 30 - 50 % aus, die

sich durch eine Lüftungsanlage zu bis zu 90 % reduzieren lassen. Auch wenn eine Anlage mit mittleren Investitionskosten einhergeht, senkt sie den Bedarf maßgeblich und ist daher sehr wirtschaftlich. Darüber hinaus sorgt eine rltA für Feuchteschutz und Wohngesundheit und hat nicht nur wirtschaftliche Vorteile.

Anhand der vorgeschlagen Maßnahmen und der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit, haben die Besitzer und Besitzerinnen der Gebäude darüber entschieden, welche Sanierungsmaßnahmen für sie infrage kommen in Hinblick auf ein effizienteres Wärmenetz. Der Hebel wäre enorm, wurde jedoch nur in wenigen Fällen als realistisch zurückgemeldet. Für die Simulation des effizienten Wärmenetzes wurde daher ein Teil der Maßnahmen betrachtet, sodass eine Senkung des Heizwärmebedarfs um ca. 55 MWh im OPT-Zustand. einberechnet wird.

Für die Auslegung des Wärmenetzes wurde darüber hinaus für alle Gebäude zusätzlich Maßnahmen zur Heizungsoptimierung inkludiert, die bei dem Tausch des Wärmeerzeugers so oder so fällig werden und zu einer Senkung der Vorlauftemperatur beitragen. Dazu gehören unter anderem ein hydraulischer Abgleich, bedarfsgesteuerte Regelung, Dämmung der Leitungsrohre und ggf. Einbau zusätzlicher Heizkörper. Die notwendige Heizleistung kann mit den Maßnahmen insgesamt um 12 % auf 101,2 kW gesenkt werden. Die Investitionskosten für die Sanierungsmaßnahmen liegen dabei aufsummiert bei etwa 100 k€ (von einer detaillierten Kostenaufstellung wird hier abgesehen, sie liegt den Eigentümern in Form von Exposés vor).

Tabelle 6: Vergleich der Energiekennzahlen im Ist-Zustand und im Opt-Zustand (nach Polysun)

Gebäude	Q _{h,IST} [MWh/a]	Q _{h,OPT} [MWh/a]	P _{th,IST} [kW]	P _{th,OPT} [kW]	HK VL/RL [°C] // FBH; OPT@-10°C	Ø COP	E _{el} [MWh][t/Jahr]	CO ₂ -Einsparung
MFH-1	22,4	7,9	10,5	4,5	27/22 // 22/21	5,2	1,5	8,9
MFH-2 Geb1	46,3	40,7	19,2	17,3	24/21			
MFH-2 Geb2	10,8	10,8	4,2	5,6	23/22	5,4	12,4	9,9
MFH-2 Geb3	9,7	5,4	3,5	2,4	27/22			
Haus 1	26,1	23,4	11,4	11,2	52/41			
Haus 6	8,6	8,6	3,4	3,3	24/22	3,9	7	9,2
Haus 3	62,7	55,9	24,2	25	52/41,5	4,2	12,2	33,4
Haus 4	32,7	29,7	13,8	13,4	39/32 // 34/33	4,8	5	4,1
Haus 5	41,5	31	17,5	14	44/42 // 35/33,5	3,8	8,1	12,5
Haus 2 + Haus7	17,6	10	7,3	4,5	37/30	5,4	1,3	2,2
Gesamt	278,4	223,4	115	101,2			47,5	79,1

Wärmeerzeuger								
TWW ¹¹		44,4		10	60/45	4,3	9,5	-0,25
LWP	350	158	265	75	5/3 (1,2-12)	7	25,3	-0,6

Die Wärmeverbrauchs-, bzw. Erzeugungswerte der Berechnung und Simulation weichen ca. ±5 % voneinander ab. Ursache dafür sind zum einen, dass Bauteilkonstruktionen nicht so homogen sind, wie abbildbar, und dass der Nutzungseinfluss in der Berechnung nicht berücksichtigt werden kann. Hierfür wurden Anpassungen in der Berechnungsgrundlage für die Simulation manuell in den jeweiligen Heizkörperlisten der Monatsbilanzen über die effektiv beheizten Flächen individuell angepasst. Dazu zählt beispielsweise, dass Flure oder ein Anbau eine Temperatur von 20 °C nicht ganzjährig einhalten müssen. Zudem gibt es leichte Unterschiede in der erzeugten Wärmemenge der Wärmepumpen bei leichten Änderungen in der Simulation z.B. durch geänderte Betriebszeiten oder mehr Einfluss durch Solarthermie und bessere Regelalgorithmen. Hier gibt es in den Übergangsmonaten Apr - Mai und Sep - Okt nur eine monatsstarke Möglichkeit Heizkreise oder Erzeuger in Bezug auf solare Gewinne zu berücksichtigen ohne eine Unterdeckung an Raumwärme in Kauf zu nehmen. Dies sind Unsicherheiten, die in der Realität durch bessere Steuerungen effizienter laufen können.

11 Trinkwassererwärmung zusammengefasst in einer Einheit mit Systemtest

Eine weitere Einschränkung besteht darin, dass Wärmepumpen in der Simulation nur mit Nennleistung in Abhängigkeit der Temperaturniveaus betrieben werden können. Das führt dazu, dass die realen COPs um ca. 1 besser sein werden, als in der Simulation. Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund dieser Möglichkeiten in der Realität der elektrische Wärmebedarf, COP und Leistung merklich besser sein wird. Beispielsweise ergibt eine optimierte Simulation eine JAZ ~7 der LWP. In der Realität kann sie jedoch bei 8 - 10 liegen. Dies wird in der Summe eine JAZ von ca. 4 statt 3 für das gesamte Netz bewirken. Mit diesen Optimierungsversuchen wurden so mehrere Dutzend Simulationen gerechnet. Im folgenden werden Simulationsbeispiele grafisch präsentiert und die Ergebnisse ausgewertet:

Auswertung

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Simulation als Verläufe über das Jahr, der kritischen kalten Wochen und Tage.

• Jahres-Verlauf, optimierte Gebäude

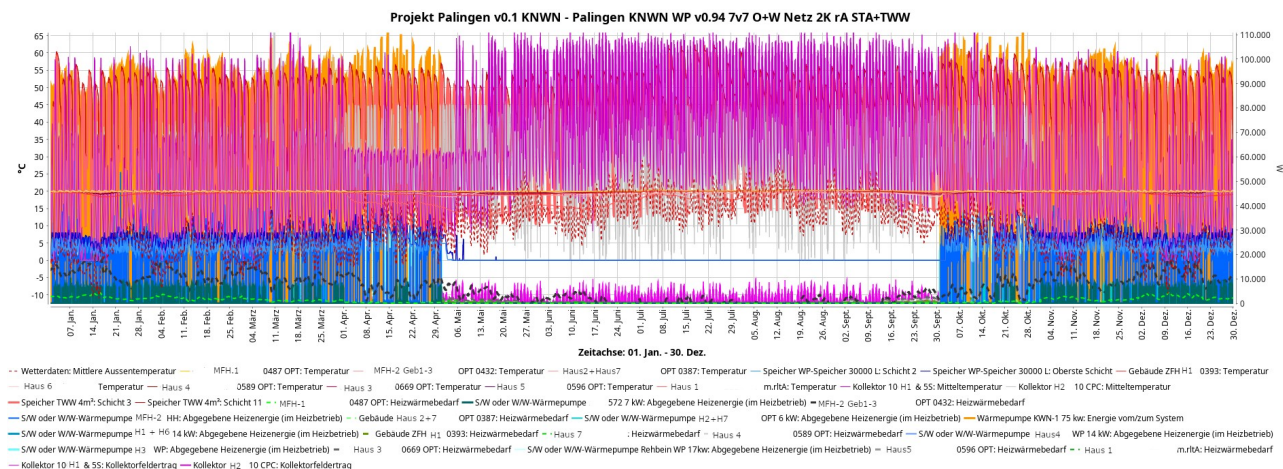


Abbildung 6: Jahres-Verlauf, zu sehen sind Mittlere Außentemperatur, Gebäudetemperaturen, Heizwärmebedarfe, Temperaturen der LWP, Booster-WPs, Speicher, Abgegebene Heizenergie an die Gebäude, Kollektorertrag

• Januar-Woche (2. Kalenderwoche), optimierte Gebäude

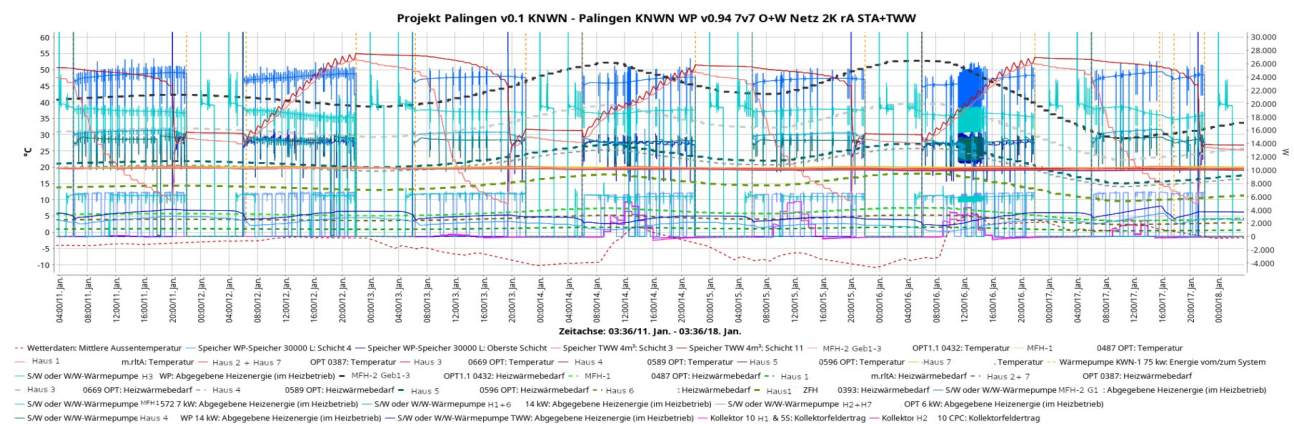


Abbildung 7: Einzelwärmeleistungen und Heizwärmebedarf der optimierten Haushalte, Raumtemperaturen, Solarthermiejeeintrag und TWW- und Pufferspeichertemperatur

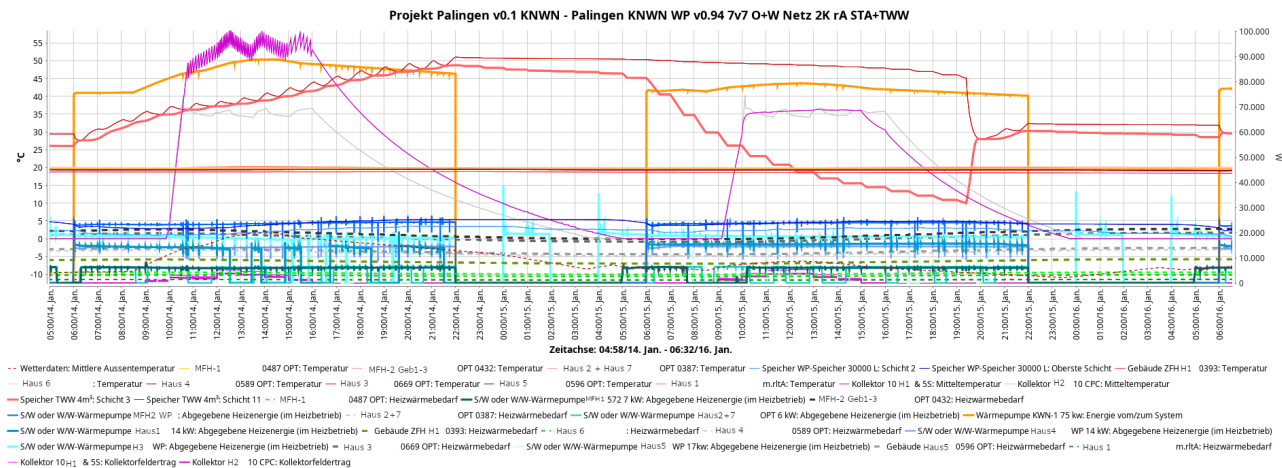


Abbildung 8: Leitungsabgabe der zentralen LWP 75 kW, im optimierten Gebäudezustand nach Wahl und zentraler TWW Bereitung

- **kältester Tag im Jahr, optimierte Gebäude**

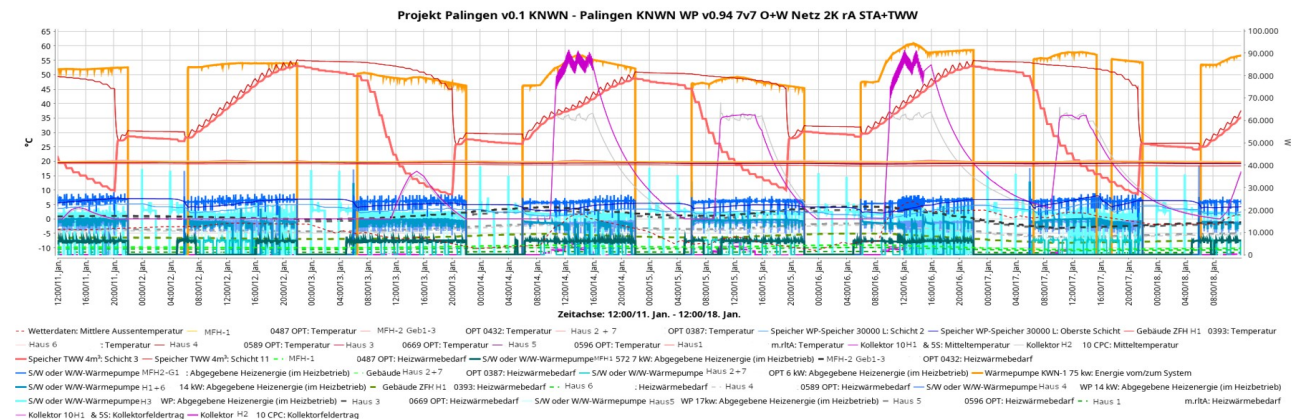


Abbildung 9: Worst Case: kältester Tag im Jahr

Die grafische Auswertung zeigt, dass ganzjährig der Raumwärmebedarf bei 20°C durchschnittlich in jedem Gebäude gedeckt werden kann. Das bedeutet, dass sowohl die hauseigenen Wärmepumpen ausreichend Leistung haben und mit den teilweise modifizierten Heizkörperflächen genügend Wärme aus dem Netz in die Innenräume transportieren können. Die zentrale Luftwärmepumpe hat auch bei kalten Außentemperaturen ganzjährig ausreichend Leistung und Entzugswärme, um die Vorlauf-Temperatur im Netz zu gewährleisten. Auch bei simulationsbedingter Nennleistung der Wärmeerzeuger mit den gewählten Pufferspeichern bleibt der Betrieb ruhig und führt nicht zu kurzen Betriebszeiten und unnötig vielen Intervallen (hohe Zyklenzahlen > 500 pro Jahr, simulationsbedingte Zyklenzahlen können vernachlässigt werden). Die Simulation zeigt auch, dass die Solarthermie (25 m² CPC: Jahresertrag 8,6 + 5,8 MWh) im Winter an besonders kalten klaren Tagen zusätzliche Leistung in das System eintragen kann. Ab der Übergangszeit April bis Oktober deckt sie den Bedarf an TWW fast vollständig ab – je nach Ausrichtung und Fläche. Dieses Verhalten ermöglicht, dass die Wärmepumpe in diesen Zeitraum ruhen darf, was die Systemeffizienz und Lebensdauer erhöht und Betriebskosten senkt. Mit der geringen Spreizung von 2 K im Netz wird gewährleistet, dass ausreichend Reserve für den Betrieb ohne Glykol mit 5 °C Vorlauf und 3 °C Rücklauf in der Regel (minimal 1,2 °C) gewährleistet werden. Der Betrieb ohne Glykol ist aus wasserrechtlichen

Gründen und Effizienzgründen sehr bedeutsam. Es vereinfacht zum einen den Genehmigungsprozess. Zum anderen erlaubt es einen geringen Volumenstrom, denn Wasser hat die höchste Wärmekapazität. Je mehr Glykol beigemischt wird, um so mehr wird die Wärmekapazität absenkt. Das führt dazu, dass mehr Flüssigkeit für die selbe Energiemenge transportiert werden muss.

Für eine realistische Einschätzung der Systemeffizienz kann angenommen werden, dass der COP der Wärmepumpen (alle mit dem Kältemittel R-290 bzw. Propan) in der Realität +1 erreicht, da sie nur selten bei Nenndrehzahl arbeiten, sondern im Mittel mit 50 %. Für die LWP im durchschnittlichen Arbeitsbereich mit einem Hub von ca. 15 K kann daher ein COP von 8 - 9 mit Propan angenommen werden. Mit Isopenthan können bei diesen Parametern mit einem COP von 10,3 (-10 °C → +7 °C)¹² theoretisch gerechnet werden. Ammoniak ist für so kleine Maschinen nicht realistisch und x-Butan wird aufgrund der Schmierung nicht funktionieren. Luftwärmepumpen mit R-290 sind in dem Leistungsbereich unproblematisch, benötigen jedoch handelsüblich eine minimale Vorlauftemperatur von 20°C. Dadurch wird der COP stark abgesenkt, da der Temperaturhub 20 - 30 K beträgt und auf 5 - 7 °C herunter gemischt werden müsste (+ 2,5 m³ Zwischenpuffer). Intensive Gespräche mit Wärmepumpenherstellern laufen, um hier eine bessere Lösung zu finden und einen COP von 10 zu erreichen. Oberhalb der Mindest-Netz-Vorlauftemperatur (ca. ≥ 5 °C) kann ein Direktwärmetauscher zum Einsatz kommen, der die Effizienz wiederum deutlich erhöhen würde. Die Realisierung einer direkten LWP in einem kalten Nahwärmenetz ist weitgehend Neuland für die meisten Hersteller und benötigt einen gewissen Mehraufwand, der sich aber wirtschaftlich lohnt zu lösen. Gesucht wird eine Wärmepumpe mit einer senkenseitigen Vorlauftemperatur von konstant 5 - 10 °C und minimaler Spreizung von ca. 3 K (bei ca. 50 % Nenndrehzahl). Eine zwei-stufige Alternative könnte auch eine Magnetokalorische WP sein, die keine minimale Spreizung, Kältemittel oder Öl benötigt.

Bei einer Netztemperatur von 4 - 7 °C kann mit einem nahezu permanenten Wärmegegewinn aus dem Erdreich gerechnet werden. Aus den Energiebilanzen der OPT-Simulation resultiert 11,4 MWh/a, wobei die Nutzung durch eine optimierte Betriebsweise deutlich mehr Erd- und Umweltwärme eingesammelt werden kann. Zusammenfassend benötigen die Booster-Wärmepumpen der Haushalte eine Gesamtleistung von 101 kW auf 7 Wärmepumpen in einem Leistungsspektrum von 5 - 25 kW verteilt. Die zentrale LW-Großwärmepumpe (Sondermodell) benötigt 75 kW mit einer Wärmelieferung von 158 MWh.

Insgesamt beträgt der Wärmebedarf ~ 240 MWh/a (OPT), wobei 47,5 + 25,5 MWh/a elektrisch und 14 MWh aus solarer Wärme zugeführt werden. Dies entspricht einer JAZ (verbraucherseitig) von 3,3. In einem optimiert betriebenen System mit ggf. 20 MWh/a durch indirekte Erdwärme, einer JAZ von 6 für die Booster-Wärmepumpen und 9 für die LWP ist eine Jahresarbeitszahl (JAZ) von 4,4 im Gesamtsystem realistisch. Durch mehr Solarthermie-Kollektoren von bis zu 60 m² kann die Jahresarbeitszahl erheblich gesteigert werden. Zwar können haushaltsspezifische Einzel-LWP-Systeme in mäßig sanierten Bestandsgebäuden auch JAZ von 5,3 aufweisen, haben jedoch deutlich höhere Investitionskosten und können keine Strom- und Wärmegegewinne vom Erdkörper aufnehmen. Gerade der Eintrag von netzeigenem PV-Strom und Solarthermie haben das Potenzial die Betriebskosten erheblich zu senken.

Das Kalte Nahwärmenetz im IST-Zustand (~ 280 MWh/a Heizwärmebedarf) verhält sich sehr ähnlich. Zwar wird die Effizienz einiger Booster-WP im Netz eine geringere Effizienz aufweisen, dies wird jedoch nur einen Einfluss auf die Größe der LWP haben. Da die bereitzustellende Wärmemenge größer wird, kann dies den Wärmepreis wieder senken.

Welche Ausgestaltung das Netz mit seinen Nutzern letztendlich haben wird, bestimmt die Anlagenkonfiguration, die Herstellerauswahl, Systemrealisierung, Effizienz, Investitionskosten und letztendlich den Wärmepreis. Die Vor-/Machbarkeitsstudie kann daher eine sehr gute Realisierungsmöglichkeit, auch nach Gesprächen mit Herstellern vorab (nicht Bestandteil der Studie) bestätigen und realistische Kennwerte innerhalb der Toleranzen im ersten Schritt abschätzen. Weitere Schritte sind für eine detaillierte Planung notwendig, gerade weil ein Stück weit Neuland (Grund für die Machbarkeitsstudie) betreten wird.

¹² <https://www.sweet-decarb.ch/wiki-2108>

In Tabelle 7 sind die Netzparameter für den OPT-Zustands des Wärmenetzes zusammengefasst.

Tabelle 7: Netzparameter für den OPT-Zustand und realistischen OPT-Zustand aus der Simulation & Abschätzung hieraus

	Wert (real, opt)	Wert (simu, opt)
Volumenstrom [m³/h]	36 (24(W) + 12 (O)), 6 kPa	36 (24(W) + 12 (O)), 6 kPa
Maximale Druckdifferenz [bar]	1,3	1,3
Druckverluste [kPa]	35 kPa (worst-case), ≤6 kPa (normal) ¹³ @ DN80, i.72 mm Ø	35 kPa (worst-case), ≤6 kPa (normal) @ DN80, i.72 mm Ø
Temperatur-Spreizung [K]	2 (5/3)	2 (7/5)
Heizwärmebedarf [MWh/a]	237 MWh, davon 14 MWh aus Solarthermie und 55 MWh Strom	237 MWh, davon 14 MWh aus Solarthermie und 73 MWh Strom
Q _h LWP [MWh/a]	75, JAZ= Ø 9	75, JAZ= Ø 7
E _{el} LWP [MWh/a]	17 (12 A 3 ph)	25 (14 A 3 ph)
E _{el} BoosterWP [MWh/a]	37, JAZ= Ø 4,8	37, JAZ= Ø 6
Leitungsgewinne [MWh/a]	11	20
JAZ - Gesamtsystem	3,3	4,4
Strang-Topologie mit Ast	275 m Hauptstrangleitung, 3-Rohr Erdrakete 30 m³ Pufferspeicher, reines Wasser, 6 bis 22 Uhr Betrieb, Areal-Netz mit Direktvermarktung von PVA-Überschuss	110 m Ast, 130 m Stich DN80 max, PE, ungedämmt, mergeliger Boden, 15 % Erdfeuchte, 1,5 m Tiefe

13 <https://builder-calc.com/de/heizungstechnik/hydraulische-rohrleitungsberechnung-online.html>

Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit

Um die Wirtschaftlichkeit des kalten Nahwärmenetzes einzuschätzen, werden die Investitionskosten des Netzes und die Betriebskosten der zentralen und dezentralen Wärmeenerzeugung betrachtet. Was hierbei nicht betrachtet werden kann, sind Vertriebskosten, da sie direkt davon abhängig sind, wer und in welcher Gesellschaftsform das Netz schlussendlich betrieben wird.

Für das gesamte Wärmenetz wurden die Kosten der zentralen Komponenten, der Leitungsinfrastruktur sowie der hausinternen Technik abgeschätzt. Zu den Hauptkostenpositionen gehören die zentrale Luft-Wasser-Wärmepumpe auf Netzseite, die dezentralen Booster-Sole-Wasser-Wärmepumpen (SWP) in den Gebäuden, der zentrale Pufferspeicher, die Leitungsinfrastruktur sowie die notwendige IT-Technik zur Regelung und Steuerung. Im Anhang findet sich dazu eine Einzelaufschlüsselung. Es wurden dabei zusätzliche Investitionen für die Einhaltung der Schallschutzanforderungen nicht beachtet, da das Gebiet aufgrund des landwirtschaftlichen Betriebs voraussichtlich als Mischgebiet zu bewerten ist und die Wärmepumpe nachts nicht in Betrieb ist. Somit sind lediglich die Anforderungen von tagsüber 60 dB(A) einzuhalten. Die Gesamtkosten des Systems belaufen sich auf geschätzt 405 k€. Auf Anfrage bei verschiedenen Herstellern liegt der Preis von einer handelsüblichen Wärmepumpe oder Kaskade mit bis zu 100 kW Leistung bei ca. 75 k€. Nach Herstellerangaben sind in diesem Arbeitsmodus Jahresarbeitszahlen von 7 möglich. Dies gilt es für den Betrieb eines kalten Nahwärmenetzes weiter in Richtung 9-10 zu optimieren. Für ein 3-stufiges System, das die Vorlauftemperatur absenkt, werden zusätzlich ein vorgeschalteter Wärmetauscher und ein Lüftungsgerät benötigt. Die Listenpreise für diese Komponenten liegen bei etwa 20 k€. Da dies jedoch keine Standardkonfiguration ist und die Komponenten in das System angepasst werden müssen, kann es hierbei jedoch zu höheren Kosten kommen. Diese werden mit bis zu 30 k€ zusätzlich zu Netz-LWP geschätzt. Die größte Unsicherheit bei der Abschätzung der Kosten liegen bei der Netzverlegung, da die Kosten im Einzelfall stark variieren können.

Tabelle 8: Abschätzung der Investitionskosten für das Wärmenetz und des Netzpreises

Komponenten	Preis [k€]		
Netz SWP	70		
Installation in Gebäuden	155		
Netz LWP / Netz LWP mit mit 75 - 105			
Wärmetauscher + Lüfter			
Installation zentrale LWP	15		
30 m³ Tank	10		
Netz	60 - 120		
Netz-IT	20		
		Mit 35 % KfW-Förderung	Mit 60 % Förderung durch das Land Mecklenburg-Vorpommern
Summe Netzkosten [k€]	405 - 495	263 - 322	162 - 198
Netzpreis IST (30 Jahre) [ct/kWh]	4,2 - 5,1	2,7 - 3,3	1,7 - 2,0
Netzpreis OPT (30 Jahre) [ct/kWh]	4,7 - 5,8	3,1 - 3,7	1,9 - 2,3

Der thermische Wärmebedarf liegt bei $E_{th,IST} \approx 280$ MWh/a und $E_{th,OPT} \approx 240$ MWh/a. Der Trinkwarmwasserbedarf liegt in beiden Varianten bei ca. 45 MWh/a. Der Netzpreis ergibt sich aus den geschätzten Netzkosten durch den zu erzeugenden Wärmebedarf über 30 Jahre.

Unter Berücksichtigung einer 35%-Förderung (KfW) reduziert sich der Eigenanteil auf 263 bis 322 k€, bei einer 60%-Förderung (Land Mecklenburg-Vorpommern) auf 162 bis 198 k€. Da das Netz die Anforderung für die 60 % Förderung voraussichtlich erfüllt, ergibt sich hierbei ein Netzpreis von 1,7 bis 2,3 ct/kWh (über 30 Jahre). Damit liegt man unter den typischen Wärmegestehungskosten konventioneller Einzellösungen (≈ 7 bis 12 ct/kWh), die jedoch keine Netzkosten betrachten.

Gebäudeinterne Investitionen, die beim Heizungstausch unabhängig vom Versorgungskonzept anfallen, wurden hier nicht einberechnet. Dazu gehören u.A. der hydraulische Abgleich, Elektroarbeiten (Demontage, Inbetriebnahme), Pufferspeicher und Planung durch den Handwerker und Planungsbüro. Vorteil bei dem Netz ist hierbei, dass dezentrale Booster-Wärmepumpen typische Kosten individueller Wärmepumpenlösungen (Außengerät, Fundament, Schallschutz) vermeiden. Ebenso konnten hier nicht anfallende Zusatzkosten betrachtet werden, die abhängig vom Betreibermodell und der Finanzierung abhängig sind. So ist mit einem Aufschlag auf den berechneten Wärmepreis zu rechnen für den Betrieb des Wärmenetzes – je nach dem, ob das Netz intern oder extern betrieben wird.

Zusätzlich zum Netzpreis ergibt sich der gesamte Wärmegestellungspreis aus den Wärmeerzeugungskosten, die hier vom Strombedarf abhängig sind. Der Erzeuger-Wärmepreis ergibt sich aus dem Elektrischen Bedarf und den Strompreis von 20 ct/kWh (mit Wärmepumpentarif) bezogen auf den gesamten Heizwärmebedarf. Für den Ist-Zustand ergibt sich somit ein Erzeuger-Wärmepreis von 5,9 ct/kWh. Im real abgeschätzten optimierten Fall liegt er bei 5 ct/kWh.

Tabelle 9: Vergleich der Wärmepreise im IST- und OPT-Zustand

Simulationsstand kaltes NaWäNetz	IST-Zustand	OPT-Zustand	OPT-real Zustand
P_{installiert} Gebäude [kW]	115	101	101
P_{inst} LWP [kW]	~90	~75	~75
E_{Heizwärme} [MWh/a]	278,4	223,4	210
E_{el} [MWh/a]	81,9	62,7	53
Erzeuger-Wärmepreis [ct/kWh]	5,9	5,6	5
E_{TWW} [MWh/a]	44,7	44,7	44,7
E_{TWW,el} [MWh/a]	9,5	9,5	9,5
TWW-Wärmepreis [ct/kWh]	4,3	4,3	4,3
Netzpreis [ct/kWh]	1,7 - 2,0	1,9 - 2,3	1,9 - 2,3
Energiepreis		1,2	1,3
Sanierungsmaßnahmen [ct/kWh]			
Solarthermie [ct/kWh]		4,2	4,2
Gesamtpreis [ct/kWh]	6,9 - 7,7	8,5 - 8,9	8,1 - 8,5

Daraus resultiert ein Wärmepreis von insgesamt bis zu 7,7 ct/kWh im Ist-Zustand. Beim OPT-Zustand (real) liegt der Wärmepreis zwischen 8,1 bis 8,9 ct/kWh. Wenn weniger Wärme erzeugt/abgenommen wird, aber die Systemkosten sich nur geringfügig verringern, dann steigt der Wärmepreis. Jedoch sinkt für energetisch sanierte Gebäude auch die Abnahmemenge, was die jährlichen Energiekosten zum IST-Zustand dauerhaft reduziert. Der Unterschied zwischen beiden Varianten resultiert aus dem Erzeugerpreis, der von der Effizienz des Systems abhängig ist. Der Netzpreis ist konstant, da nicht abschätzbar ist, wie sich eine Großwärmepumpe mit kleinerer Leistung niederschlägt. Zum OPT-Zustand werden die Investitionskosten, die die Haushalte für Sanierungsmaßnahmen von insgesamt 100 k€ aufwenden einberechnet. Es ergibt sich dadurch eine Einsparung von ca. 55 MWh. Berechnet auf den geringeren Bedarf ergibt sich ein über 30 Jahre gerechneter Energiepreis von zusätzlich 1,2 bzw. 1,3 ct/kWh. Nach Ablauf von 30 Jahren reduziert sich der Wärmepreis effektiv um 2 ct/kWh (heutige Inwertsetzung), jedoch ist mit einer fortschreitenden Umstellung des Stromsystems auf PV und Wind, inkl. mehr Speicher und Marktflexibilisierung mit einer zusätzlichen Preissenkung bis 2040 um ca. 1,5 ct/kWh (heutige Inwertsetzung) zu rechnen sein. Mit einem Kalten Nahwärmenetz ohne fossile/biogene Energieträger wird heute und zukünftig deutlich günstiger und preisstabiler als eine weitere Versorgung mit Erdgas/Biomasse/Öl sein.

Zusätzliche Einsparpotenziale

Das Netz bietet zusätzliche wirtschaftliche Synergien. Die saisonal mögliche Lastverschiebung ermöglicht eine bessere Integration von PV-Eigenstrom. Die Aufnahmekapazität beträgt bis zu 10 MWh/Monat. Batteriespeicher und die Direktvermarktung von Nicht-EEG-Strom bzw. Einspeisepreise von ca. 10 - 15 ct/kWh sind für Wärmenetz- und PV-Betreiber sehr wirtschaftlich und können den Wärmepreis deutlich senken. Die solarthermische Einspeisung ist technisch gut möglich (100 % Nutzungsgrad bis mindestens 60 m² Vakuumröhrenkollektoren) und senkt die spezifischen Wärmegestehungskosten und verlängert die Lebensdauer der LWP bzw. auch der SWP.

Nachhaltigkeit

Durch ein auf den Bedarf optimiertes Heizungssystem, niedrige Netztemperaturen, die Nutzung natürlicher Kältemittel und ökologischer bzw. nicht extraktivistischer Baumaterialien hat das geplante Wärmenetz ein sehr hohes Maß an Nachhaltigkeit.

Mit der Nutzung von Umweltwärme und einer hohen Effizienz, wird der Energieverbrauch und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen massiv gesenkt. Mit einem aktuellen Gas-Verbrauch von ca. 262 MWh und einem angenommenen Emissionsfaktor von 0,202 kgCO₂/kWh (Gas/Öl) ergibt sich inklusive der bekannten Holznutzung eine CO₂-Ausstoß-Minderungspotenzial von 79,1 tCO₂ im Jahr (Ökostrom).

Die Emission von CO₂ im geplanten Wärmenetz hängt maßgeblich von der Entwicklung des Strommixes bzw. der Nutzung eines Ökostrom-Anbieters ab. Der Bundes-Strommix hat einen aktuellen Anteil von an erneuerbaren Quellen von über 60 %. Der restliche Anteil wird weiterhin aus Kohle, Öl und Methan bezogen, wodurch der Emissionsfaktor für den Strommix bei ca. 0,366 kgCO₂/kWh liegt. Die Emissionen im Wärmenetz liegen dann bei 23 tCO₂ im Jahr. Mit einem Ökostrom-Anbieter bezieht man den Strom komplett aus erneuerbaren Quellen und damit einen minimalen Emissionsfaktor von 0,025 kgCO₂/kWh. Dadurch ergeben sich Emissionen von lediglich 1,6 tCO₂ im Jahr und fällt somit auf 2 % von dem aktuellen Ausstoß.

Über den Lebenszyklus betrachtet entstehen die größten Umweltwirkungen in der Bauphase, insbesondere durch Rohstoffe wie Kupfer, Stahl, Elektronik und Kunststoffe. Das Wärmenetz wurde so konzipiert, dass technisch gesehen eine lange Lebensdauer zu erwarten ist. So werden die Wärmepumpen mit möglichst niedriger Zyklenzahl betrieben, wodurch sich die Lebensdauer deutlich verlängert. Dadurch relativieren sich die Auswirkungen auf Umwelt und Klima stark über die Zeit. Ebenso wurde beachtet, dass Umweltquellen wie das Erdreich nicht überlastet werden und sich über den Sommer wieder regenerieren können. Durch die Integration von Solarthermie und Photovoltaik wird das Netz effizienter, resilienter und unabhängiger von äußeren Faktoren wie den Import von fossilen Brennstoffen.

Weitere Aspekte und nächste Schritte

Für die Umsetzung des kalten Nahwärmenetzes sind neben der technischen und wirtschaftlichen Planung zusätzliche organisatorische, regulatorische und planerische Aspekte zu berücksichtigen. Diese Faktoren sind maßgeblich für eine möglichst reibungsarme Installation, einen langfristigen Betrieb, Effizienz und Erweiterbarkeit des Systems.

Betreiber- und Finanzierungskonzept

Für den Betrieb eines Wärmenetzes gibt es unterschiedliche Modelle, die sich maßgeblich auf die Steuerung, Haftung, Finanzierung und Preisgestaltung auswirken. Es gibt die Möglichkeit gemeinschaftlich eine eigene Struktur aufzubauen, z.B. als Genossenschaft oder als GbR, oder extern zu vergeben, z.B. in kommunale Hand oder in die Hand eines privaten Energiedienstleisters. Die Betrachtung der verschiedenen Modelle ist nicht Teil dieser Untersuchung. Es ist aber zu beachten, dass der gesamte Wärmepreis abhängig vom gewählten Modell höher ausfallen wird.

Systemabgrenzung und Netzdefinition

Eine klare Abgrenzung der Systemgrenzen ist für Planung, Kostenallokation und Betreiberkonzept essenziell. Es ist vorab zu definieren, wo das Netz anfängt und aufhört. Zum Netz gehören i.d.R. die zentrale Wärmepumpe, der Pufferspeicher, die Verteilungsleitungen einschließlich aller Hauptleitungen sowie die Anschlusspunkte an den Gebäuden. Ob die Netzgrenze an den jeweiligen Hausübergabepunkten endet oder das gebäudeseitige Heizungssystem mit Booster-Wärmepumpe, netzseitiger Pumpe, Speicher und Regelung integriert ist, sollte man vorher genau festlegen, um Verantwortlichkeiten, Förderfähigkeit und Betriebsumfänge genau bestimmen zu können. Ein Vorteil inkludierter (Wärme-)Pumpen in einem Arealnetz ist die direkte Einspeisung von PV-Strom und kompletter Abdeckung, sowie die Planung mit flexiblen Stromtarifen. Hierdurch lassen sich die Wärmepreise und Wartungskosten erheblich reduzieren.

Baurechtliche Rahmenbedingungen

Für den Netzbau sind Genehmigungs- und Abstimmungsverfahren notwendig, insbesondere hinsichtlich Leitungsrechten, Tiefbauarbeiten und der Verlegung von Stromkabeln im öffentlichen oder privaten Raum. Die zentrale LWP kann genehmigungsrelevant sein, abhängig von Bauordnung und Schallschutzanforderungen. Die frühzeitige Abstimmung mit Bauamt, Gemeinde und Netzbetreibern (Strom) ist daher sinnvoll.

Aufstellungsbedingungen der zentralen LWP:

Zur Gewährleistung der Funktionsfähigkeit und Effizienz der zentralen Groß-LWP sind die folgenden Aspekte für den Aufstellungsort zu beachten:

- Freistehende Position mit ungehinderter Luftzufuhr und ungestörter Zu- und Abluftströmung
- Tragfähiges Fundament zur Aufnahme von Schwingungen und Lasten
- Schallschutzanforderungen gemäß TA Lärm:
 - reines Wohngebiet: ≤ 50 dB(A) tagsüber, ≤ 35 dB(A) nachts
 - Dorf- und Mischgebiete: ≤ 60 dB(A) tagsüber, ≤ 45 dB(A) nachts
- Netztopologische Positionierung: idealerweise zentral im Versorgungsgebiet, um Druckverluste zu minimieren und Temperaturspreizungen auszugleichen

Feinplanung und technische Spezifikation

Diese Voruntersuchung stellt eine theoretische bzw. simulationsgestützte Bewertung des potenziellen Wärmenetzes dar, auf der es nun möglich ist in eine vertiefte Feinplanung zu gehen. Für die tatsächliche Umsetzung ist es erforderlich, Hersteller bezüglich konkreter Komponenten anzufragen und auszuwählen, Herstellerangaben zu berücksichtigen und technische Auslegungen zu präzisieren. Das bezieht sich insbesondere auf die Großwärmepumpe. Die Luftwärmepumpe bildet die Basis eines Wärmenetzsystems. Jedes System an sich ist jedoch eine Einzelanfertigung von einem zertifizierten Basismodell und muss auf den konkreten Anwendungsfall zugeschnitten werden. Daher sind nun die Gespräche mit den Herstellern fortzuführen, ob eine Wärmepumpe mit den angegebenen Parametern speziell konzipiert werden kann, um die Effizienz insgesamt anzuheben.

Zusammenfassung

Im Rahmen der Voruntersuchung wurde die technische und wirtschaftliche Machbarkeit eines kalten Nahwärmenetzes für 11 Gebäude im Unterdorf von Palingen analysiert. Auf Basis detaillierter Gebäudeaufnahmen und der energetischen Bewertung nach DIN V 18599 wurde ein Heizwärmebedarf von über 270 MWh/a im Ist-Zustand ermittelt. Die Simulation in Polysun zeigt, dass die installierten Heizleistungen der Bestandsanlagen mit 265 kW stark überdimensioniert sind. Die erforderliche Heizleistung liegt lediglich bei 115 kW (IST) bzw. 101 kW (OPT).

Es wurden gezielte Sanierungsmaßnahmen aufgezeigt, insbesondere durch den Einbau raumluftechnischer Anlagen, Verbesserungen der Gebäudehülle und Heizungsoptimierung, durch die der Gesamtwärmebedarf um etwa 35 % gesenkt werden kann. Dadurch können die erforderlichen Vorlauftemperaturen an den Gebäude weiter gesenkt werden, wodurch die Effizienz des Wärmenetzes steigt. Die realistisch umsetzbaren Maßnahmen von den Eigentümern belaufen sich auf eine Reduzierung des Gesamtwärmebedarfs um 12 %. Das kalte Wärmenetz wurde auf diese beiden Varianten im IST-Zustand und im Zustand mit den ausgewählten Maßnahmen (OPT) simuliert.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse zeigt, dass das geplante Netz bei Nutzung verfügbarer Förderprogramme wettbewerbsfähige Wärmepreise mit Netzkosten inkl. Abschreibung von etwa 7,7 bis 8,9 ct/kWh ermöglicht. Durch die niedrige Netztemperatur von 4 - 10 °C können die Rohrleitungen zusätzlich als Erdkollektor fungieren und nehmen so zusätzlich bis zu 11 - 20 MWh/a Wärmegewinne auf. Die Rohrleitungsverlegung ist dabei besonders günstig, da sie nicht gedämmt werden muss. Dies führt jedoch zu besonderen Anforderungen an die Luft-Wasser-Großwärmepumpe bezüglich der Vorlauftemperatur. Mit handelsüblichen Luftwärmepumpen muss daher ein Mischkreis vorgeschaltet werden, der die Temperatur absenkt. Dies führt dazu, dass der theoretisch erreichbare JAZ von 10 abgesenkt wird und voraussichtlich nicht besser als bei 7 liegen kann. Der JAZ des Gesamtsystem liegt dann bei 4. In Zusammenarbeit mit einem Hersteller kann sich jedoch der Mehraufwand für eine Sonderanfertigung einer Wärmepumpe, die auf diese Anforderungen zugeschnitten ist, lohnen. Zum einen wird dadurch eine deutlich höhere Effizienz erreicht. Zum anderen stellt das optimierte Netz ein innovatives Beispiel für nachfolgende Wärmenetzplanungen und -umsetzungen dar.

Die Einbindung von Vakuum-Solarthermie kann bis zu 60 m² komplett vom Wärmenetz aufgenommen werden, steigert die Effizienz und die Lebensdauer des Systems und ist daher besonders wirtschaftlich.

Insgesamt bestätigt die Untersuchung, dass ein kaltes Nahwärmenetz in Palingen sowohl technisch möglich als auch wirtschaftlich günstiger gegenüber einer konventionellen fossilen Wärmeversorgung mit Gas, Holz oder Öl und gegenüber Einzelwärmepumpen in den meisten Haushalten ist.

06.03.26, Oranienburg/Berlin
Stefan Golla/Josepha Altmann

Anhang

Investitionskosten

Gebäude	Kosten OPT SWP iDM [k€]	Installations- kosten SWP ¹⁴ [k€]	Groß- LWP ¹⁵ [k€]	Wärmetau- scher + Lüfter ¹⁴ [k€]	Installations- kosten LWP [k€]	Wasser- tank ¹⁶ [k€]	Netzkosten ¹⁷ IT [k€]	Gesamt [k€]
MFH-1	5	27						
MFH-2- Gebäude1	16	34						
MFH-2- Gebäude2								
MFH-2- Gebäude3								
Haus1 + Haus6	10	28						
Haus2 + Haus7	5	16						
Haus3	14	19						
Haus4	10	14						
Haus5	10	17						
Summe	70	155	75	30	15	10	60 - 120	20 405-495

Leitungskosten: 3 Leitungen, PE-Rohre¹⁸ 10 €/m, Erdrakete 30 pro €/m¹⁹ bei 15 Abschnitte = 450 €/m, 500 € pro Kopfloch

150 m, 9 Kopflöcher	18.000 €
2 x 40 m, 3 Kopflöcher	5.550 €
130 m, 7 Kopflöcher	14.300 €
Stichleitungen – 7 Kopflöcher	3.500 €
Summe	41.350 €

14 Anhand von Installationskosten für Einzelwärmepumpen aus eigener Erfahrung

15 Anfrage an Hersteller für LWP mit 70-100 kW und mehrstufiges System mit Plattenwärmetauscher + Lüftungsgerät

16 <https://wasserzisterne.de/volumentank-2/>

17 Leitungskosten + Erdarbeiten überschlagen
<https://www.deutscher-bauzeiger.de/bauen/baugrube/erdaushub/erdarbeiten-kosten/>

18 <https://www.baupreislexikon.de/bauleistung/druckrohre-pe>

19 <https://kostencheck.de/erdrakete-kosten-pro-meter>

Abbildungen

Abbildung 6

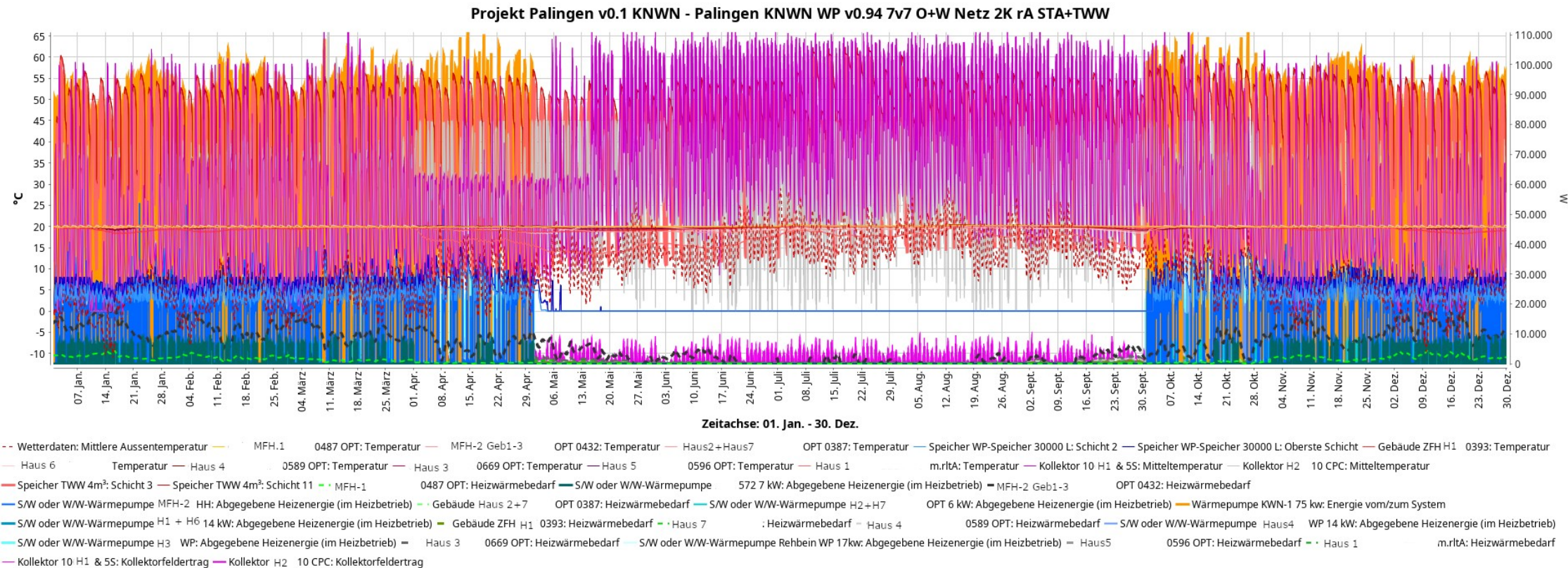


Abbildung 7

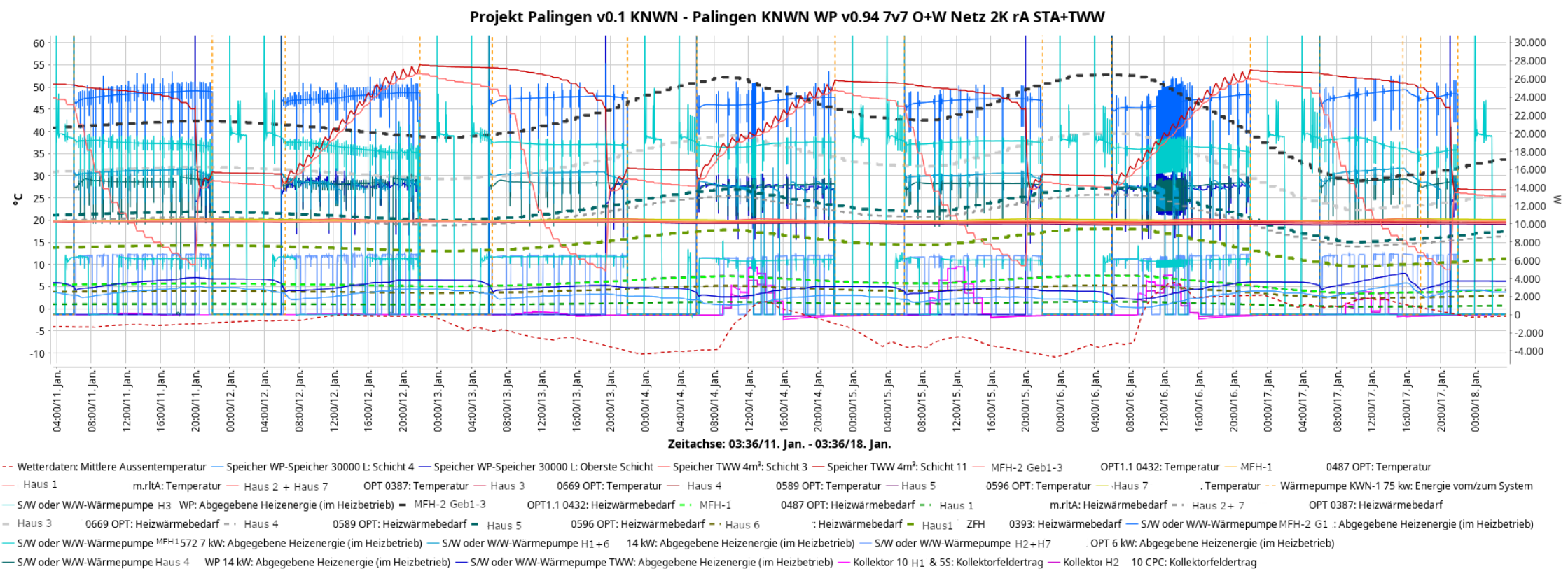


Abbildung 8

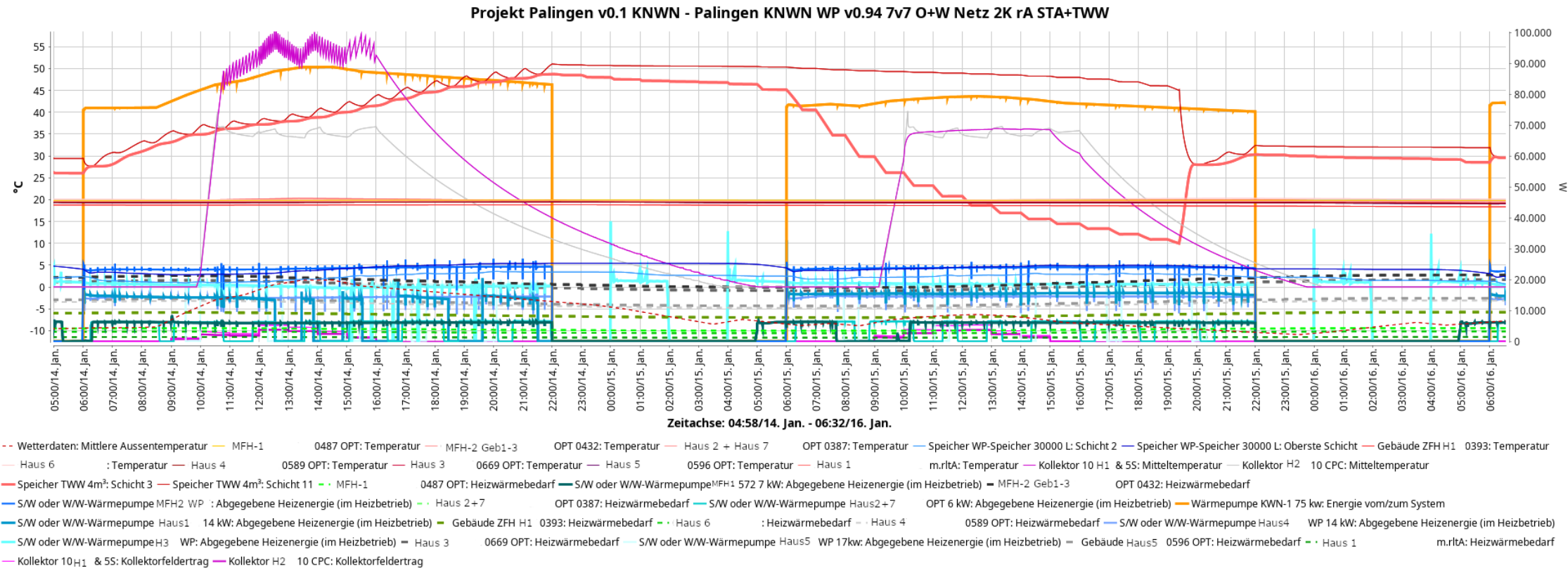


Abbildung 9

