



AUTENSYS

POTENZIALSTUDIE NAHWÄRME

KOMMUNE WALDENBUCH



Bearbeiter: M.Sc. Joey Kiefer

Erstellungszeitraum: Mai – November 2022

ENERGIE NEU DENKEN

1 Zusammenfassung Variantenvergleich

Die AutenSys GmbH (im Folgenden AutenSys) wurde von der Kommune Waldenbuch damit beauftragt, einen Variantenvergleich verschiedener Nahwärmekonzepte für fünf öffentliche Bestandsgebäude im Stadtzentrum durchzuführen. Ziel der Untersuchung ist es, gemeinsam verschiedene Nahwärmenetzkonzepte zu entwickeln, die zu den lokalen Gegebenheiten in Waldenbuch passen. Diese sollen dann bewertet und einander gegenübergestellt werden, um so abschätzen zu können, welche Variante(n) am vielversprechendsten ist (sind). Hierzu wurde am 19.05.2022 ein gemeinsamer Kick-Off-Termin in Waldenbuch durchgeführt. Darin wurden 5 verschiedene Nahwärmekonzepte für den Variantenvergleich sowie Vergleichs-Kriterien anhand derer die 5 Varianten miteinander verglichen werden sollen bestimmt. Folgende Varianten wurden untersucht:

- Variante 1: Referenzvariante: Kein Nahwärmenetz
- Variante 2: Nahwärmenetz mit Blockheizkraftwerk (H₂-ready)
- Variante 3: Nahwärmenetz mit Holzversorgung und Photovoltaik (PV)
- Variante 4: Nahwärmenetz mit Luft-Wasser-Wärmepumpen und PV
- Variante 5: Nahwärmenetz mit Grundwasser-Wasser-Wärmepumpen und PV

Das Gesamtergebnis ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Bewertung der Varianten erfolgt nach Schulnoten:

Bewertung Energiekonzepte im Variantenvergleich							
Variante	Investition	Laufende Kosten	Autarkiegrad	CO ₂ -Fußabdruck	Soziale Akzeptanz	Innovationsgrad	SUMME gewichtet
Gewichtung	20 %	30 %	20 %	20 %	5 %	5 %	100 %
Variante 5: Nahwärmenetz mit Grundwasser-Wärmepumpen, Holz und PV	5	2	1	1	2	2	2
Variante 3: Nahwärmenetz mit Holz, Gas-SLK und PV	4	3	5	2	3	3	3
Variante 4: Nahwärmenetz mit Luftwärmepumpen, Gas-SLK und PV	3	4	4	3	2	3	3
Variante 2: Nahwärmenetz mit Wasserstoff-BHKW und Gas-SLK	6	6	6	1	3	1	5
Variante 1: Kein Nahwärmenetz (Energieversorgung über Gas-Kessel)	1	5	6	6	1	6	5

Abbildung 1: Gewichtetes Gesamtergebnis

Auf Basis der Ergebnisse des Variantenvergleichs empfiehlt die AutenSys die Variante 5 - das Nahwärmenetz mit Grundwasser-Wasser-Wärmepumpen, Holz und PV. Dabei sollte die hierfür benötigte Heizzentrale außerhalb des Stadtzentrums liegen. Einen möglichen Standort hierfür würde beispielsweise das in der Nähe gelegene Aichtal darstellen. Varianten auf Basis von fossilen Energieträgern sind nicht zu empfehlen! In Abstimmung mit der Stadt Waldenbuch, wurde daher vereinbart für die Varianten 4 und 5 eine Detailbetrachtung vorzunehmen.

2 Zusammenfassung Konzeptphase

Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung verschiedener Nahwärmekonzepte für die Wärmeversorgung der fünf öffentlichen Gebäude im Stadtkern von Waldenbuch vorgestellt.

Aus dem im vorherigen Schritt durchgeführten Variantenvergleich mit Präsentation am 13.07.2022 sind zwei besonders aussichtsreiche Nahwärmekonzepte hervorgegangen, die in diesem Bericht detailliert in Hinblick auf Wirtschaftlichkeit untersucht werden. Das Ergebnis soll der Kommune Waldenbuch als Entscheidungsgrundlage für das weitere Vorgehen dienen.

Im Detail wurden die Siegervarianten des Variantenvergleichs analysiert:

- **Variante 5 - Sieger des Variantenvergleichs:** Zentrale Wasser-Wasser-Wärmepumpe (Erdwärme), Holz-Kessel, PV
- **Variante 4:** Zentrale Luft-Wasser-Wärmepumpe, Gas-Kessel (SLK), PV

Im Ergebnis zeigt sich, dass Variante 5 unter Berücksichtigung der Zuschläge der Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) mit 23,4 ct/kWh niedrigere Wärmegestehungskosten als Variante 4 mit 25,1 ct/kWh aufweist. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse hat sich der Vorteil von Variante 5 bestätigt. Zusätzlich gewinnt Variante 5 im Vergleich der CO₂-Emissionen, da hierbei lediglich ca. 133 t CO₂ pro Jahr emittiert werden im Gegensatz zu 219 t CO₂ pro Jahr bei Variante 4. Dementsprechend stellt Variante 5 den wirtschaftlichen Sieger und Klimaschutz-Sieger dar.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung Variantenvergleich.....	2
2	Zusammenfassung Konzeptphase.....	3
3	Ausgangslage.....	7
3.1	Aufgabenstellung und Vorgehensweise.....	7
3.2	Ist-Zustand und Rahmenbedingungen	8
4	Variantenvergleich.....	11
4.1	Grundlagen Variantenvergleich.....	11
4.2	Durchführung Variantenvergleich	12
4.2.1	Aufstellung der Varianten	12
4.2.2	Kriterienauswahl und -gewichtung.....	18
4.3	Ergebnisse Variantenvergleich	25
4.3.1	Investitionskosten	26
4.3.2	Laufende Kosten	27
4.3.3	Autarkiegrad	28
4.3.4	CO ₂ -Emissionen	28
4.3.5	Soziale Akzeptanz.....	29
4.3.6	Innovationsgrad.....	31
4.3.7	Gesamtergebnis	32
4.4	Sensitivitätsanalyse	32
4.4.1	Szenario 1: „Kosten“	32
4.4.2	Szenario 2: „Klima“	33
4.5	Handlungsempfehlung Variantenvergleich	35
5	Detailbetrachtung Siegervarianten	37
5.1	Energetische Ausgangsbasis.....	37
5.2	Technische Annahmen Nahwärmenetz.....	38
5.3	Technische Randbedingungen der Siegervarianten.....	39
5.3.1	Variante 5: Grundwasser-Wasser-Wärmepumpe, Holz-Kessel, PV.....	39
5.3.2	Variante 4: Luft-Wasser-Wärmepumpe, Gas-Kessel, PV	45
6	Annahmen zur Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	48
6.1	Investitionskosten	48
6.1.1	Annahmen Nahwärmenetz	48
6.1.2	Annahmen Erschließung Wärmequelle	48
6.1.3	Annahmen Heizungsanlage.....	49
6.2	Verbrauchsgebundene Kosten.....	50
6.3	Betriebsgebundene Kosten.....	51
6.4	Zusammenfassung.....	52
7	Ergebnis.....	53
7.1	Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	53
7.2	CO ₂ -Emissionen	54

8	Sensitivitätsanalyse.....	56
8.1	Anzahl der Anschlussnehmer	56
8.2	Stromkosten	57
8.3	Kosten Nahwärmenetz	58
8.4	Vorlauftemperaturen.....	59
9	Handlungsempfehlung.....	60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Gewichtetes Gesamtergebnis	2
Abbildung 2:	Satellitenansicht Waldenbuch.....	7
Abbildung 3:	Mögliche Standorte einer Heizzentrale	9
Abbildung 4:	Standortgegebenheiten Waldenbuch	10
Abbildung 5:	Schema Variante 2: BHKW (H2-ready)	14
Abbildung 6:	Schema Variante 3: Holzversorgung.....	15
Abbildung 7:	Schema Variante 4: Luftwärmepumpe	16
Abbildung 8:	Schema Variante 5: Grundwasser-Wärmepumpe.....	18
Abbildung 9:	Bewertungsskala Investitionskosten	20
Abbildung 10:	Bewertungsskala Laufende Kosten.....	21
Abbildung 11:	Bewertungsskala Autarkiegrad	22
Abbildung 12:	Bewertungsskala CO ₂ -Emissionen.....	23
Abbildung 13:	Bewertungsskala soziale Akzeptanz.....	24
Abbildung 14:	Bewertungsskala Innovationsgrad	25
Abbildung 15:	Ergebnis Investitionskosten	26
Abbildung 16:	Ergebnis laufende Kosten	27
Abbildung 17:	Ergebnis Autarkiegrad	28
Abbildung 18:	Ergebnis CO ₂ -Emissionen	29
Abbildung 19:	Ergebnis soziale Akzeptanz	30
Abbildung 20:	Ergebnis Innovationsgrad.....	31
Abbildung 21:	Gewichtetes Gesamtergebnis	32
Abbildung 22:	Ergebnis Szenario 1: „Kosten“	33
Abbildung 23:	Ergebnis Szenario 2: „Klima“	34
Abbildung 24:	Gewichtetes Gesamtergebnis (siehe Abbildung 22)	35
Abbildung 25:	Abhängigkeit der Netzverluste an der Wärmebedarfsdichte	39
Abbildung 26:	Niedertemperaturnetz mit zentraler Grundwasser-Wärmepumpe.....	40
Abbildung 27:	Mögliche Nahwärmenetze für Variante 5 mit beispielhaften Platzierungen der Heizzentrale	40
Abbildung 28:	Genehmigungsprozess Nutzung Grundwasser-Wärmepumpe	44
Abbildung 29:	Möglicher Trassenverlauf Nahwärmenetz für Variante 4	46
Abbildung 30:	Wärmegestehungskosten ohne Förderung.....	53

Abbildung 31: Wärmegestehungskosten mit Förderung.....	54
Abbildung 32: CO ₂ -Ausstoß der jeweiligen Varianten	55
Abbildung 33: Wärmegestehungskosten in Abhängigkeit des Wärmebedarfs.....	56
Abbildung 34: Wärmegestehungskosten in Abhängigkeit der Stromkosten	57
Abbildung 35: Wärmegestehungskosten in Abhängigkeit der spez. Leitungskosten.....	58
Abbildung 36: Wärmegestehungskosten in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aufstellung Nahwärmekonzepte für Variantenvergleich.....	12
Tabelle 2: Kriterien und Kriteriengewichtung.....	19
Tabelle 3: Kriteriengewichtung Szenario 1: „Kosten“	33
Tabelle 4: Kriteriengewichtung Szenario 2: „Klima“	34
Tabelle 5: Beschreibung der 5 Gebäude	37
Tabelle 6: Energetische Ausgangsbasis	38
Tabelle 7: Technische Annahmen Nahwärmenetz.....	38
Tabelle 8: Technische Daten Variante 5.....	42
Tabelle 9: Technische Daten Variante 4.....	47
Tabelle 10: Annahmen Kostenzusammenstellung Nahwärmenetz	48
Tabelle 11: Annahmen Investitionskosten Wärmeerzeuger	49
Tabelle 12: Annahmen Investitionskosten	50
Tabelle 13: Annahmen verbrauchsgebundene Kosten	51
Tabelle 14: Annahmen betriebsgebundene Kosten	51
Tabelle 15: Überblick Jahresvollkosten	52
Tabelle 16: Emissionsfaktoren Berechnung CO ₂ -Emissionen	55

3 Ausgangslage

3.1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise

Die Stadt Waldenbuch ist eine Kleinstadt im Landkreis Böblingen Hall und liegt im Nordosten Baden-Württembergs. Sie hat ca. 8.780 Einwohner und eine Fläche von 22,7 km². Hierzu gehört die Stadt Waldenbuch selbst, die Stadtteile Glashütte, Hasenhof und Liebenau sowie die Häuser Bachenmühle, Burkhardtsmühle und Obere Sägmühle. In Abbildung 2 ist Waldenbuch auf einer Karte darstellt.

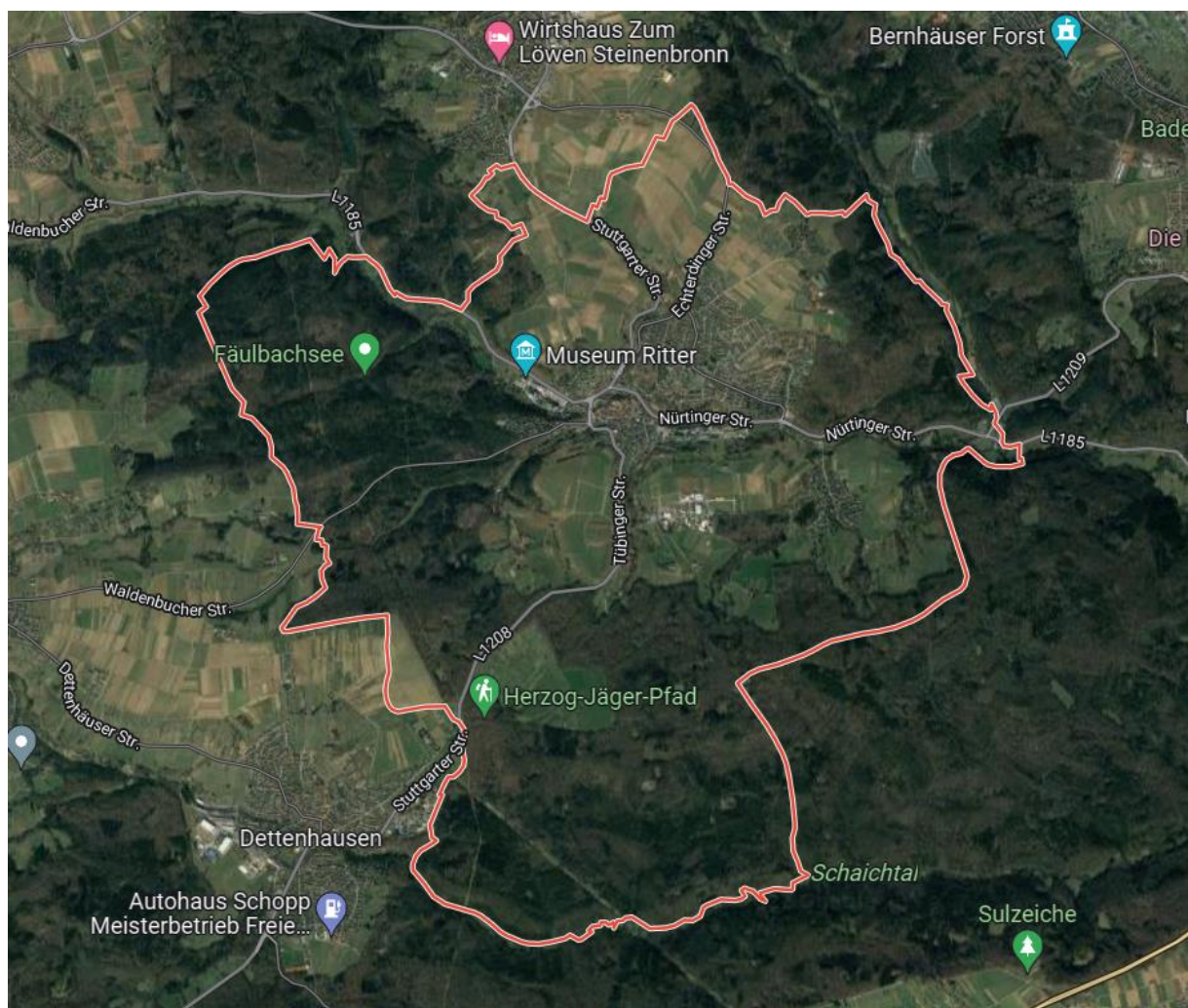


Abbildung 2: Satellitenansicht Waldenbuch¹

Im Stadtkern von Waldenbuch sollen fünf öffentliche Bestandsgebäude zukünftig unabhängig von fossilen Brennstoffen beheizt werden können. Dabei handelt es sich um das alte sowie neue Rathaus, die Musikschule, die Stadtkirche St. Veit und das Schloss

¹ <https://www.google.com/maps>

Waldenbuch, das bereits 1719 erbaut wurde und heute als Museum der Alltagskultur genutzt wird. Aufgrund des Alters der Gebäude ist eine zentrale Gegebenheit der Aufgabenstellung, mit der unzureichenden Gebäudedämmung und Energieeffizienz im Zusammenhang mit dem Denkmalschutz der Gebäude umzugehen.

Die AutenSys wurde von der Gemeinde beauftragt, einen Variantenvergleich verschiedener Nahwärmekonzepte durchzuführen. Dabei sollte vor allem auch der Aspekt der Wirtschaftlichkeit möglicher zentraler Heizanlagen unter den genannten Umständen untersucht werden. Ziel ist es, gemeinsam verschiedene Nahwärmenetzkonzepte zu entwickeln, die zu den lokalen Gegebenheiten in Waldenbuch passen. Diese sollen dann bewertet und einander gegenübergestellt werden, um so abschätzen zu können, welche Variante(n) am vielversprechendsten ist (sind). Hierzu wurde am 19.05.2022 ein gemeinsamer Kick-Off-Termin in Waldenbuch durchgeführt.

In dem Termin wurden 5 verschiedene Nahwärmekonzepte für den Variantenvergleich festgelegt. Außerdem wurden gemeinsam Kriterien sowie eine entsprechende Kriterien-Gewichtung bestimmt, anhand derer die fünf Varianten miteinander verglichen werden sollen.

Auf Basis der Ergebnisse des Workshops wurde der Variantenvergleich durchgeführt. Dabei wurden die Anforderungen und die Kriterien-Gewichtungen, welche im Workshop ermittelt wurden, berücksichtigt. Anhand einer Bewertungsmatrix geht schließlich eine Rangliste der fünf Varianten hervor, anhand derer abgeleitet werden kann, welche der Nahwärmekonzepte am besten und welche am schlechtesten zu den spezifischen Bedürfnissen in Waldenbuch passen.

Die Ergebnisse der Potenzialanalyse werden im Rahmen einer Abschlusspräsentation vorgestellt. Diese ist für den 20.11.2022 angesetzt.

3.2 Ist-Zustand und Rahmenbedingungen

Der IST-Zustand wurde im gemeinsamen Kick-Off-Termin und der Bestandsaufnahme am 19.05.2022 sowie an den vorangegangenen Gesprächen erarbeitet. Dabei wurden die Gebäude und die darin aktuell installierten Heiztechnologien begutachtet. Zeitgleich wurden mögliche Standorte für eine Heizzentrale gesucht. Diese können in Abbildung 3 betrachtet werden.



Abbildung 3: Mögliche Standorte einer Heizzentrale

Außerdem wurden weitere örtliche Potenziale, wie das nahegelegene Aichtal, in dem sich auch die Ritter GmbH & Co. KG befindet, identifiziert und besprochen. Dieses Gelände könnte eine Möglichkeit für geologische Bohrungen oder beispielsweise Platz zur Speicherung von Wasserstoff abseits des Wohngebiets liefern. In Abbildung 4 ist diese Lage ebenfalls dargestellt.



Abbildung 4: Standortgegebenheiten Waldenbuch

4 Variantenvergleich

4.1 Grundlagen Variantenvergleich

Der Variantenvergleich wird auf Basis eines Bewertungstools durchgeführt. Hierbei werden beispielhafte Wärme- und Strombedarfe als Berechnungsgrundlage herangezogen. Anschließend werden die vorab festgelegten Nahwärmekonzepte im Tool angelegt. Es wird ausgewählt, welche Energieträger (z.B. Holz oder Gas) zur Wärmeerzeugung eingesetzt und welche Wärmeerzeugungstechnologie wie viel Prozent des Wärmebedarfs deckt. Für jede Variante muss der Wärmebedarf immer zu 100 % gedeckt sein. In einem einfachen Fall würde man z.B. einen Gaskessel auswählen, dessen Anteil 50 % des Wärmebedarfs deckt. Die restlichen 50 % werden beispielsweise über eine Pelletanlage bereitgestellt.

Im Tool ist für jede Technologie (z.B. Gaskessel, Pelletanlage, etc.) zu jedem Kriterium eine Note hinterlegt. Für das Kriterium „CO₂-Fußabdruck“ wird die Pelletanlage z.B. mit einer 2 bewertet, da es sich um einen regenerativen Energieträger handelt, während ein Gaskessel z.B. mit einer „5“ bewertet wird. Bei den Investitionskosten hingegen wird der Gaskessel mit einer „1“ bewertet, die Pelletanlage hingegen mit einer „4“, da diese neben dem Kessel noch weitere teure Investitionen (z.B. Raumaustragung, Förderschnecke, Rauchgasreinigung, Pelletbunker, etc.) mit sich bringt und damit insgesamt deutlich teurer als ein einfacher Gaskessel ist. Die Notengebung ist ein Resultat von Berechnungen, Simulationen, Erfahrungswerten, Expertenmeinungen etc. und stellt eine grobe Abschätzung dar. In der Praxis hat sich gezeigt, dass dadurch sehr realistische Ergebnisse erzielt werden können.

Je nachdem, welche Technologien für die jeweilige Variante ausgewählt werden, bildet das Tool zu jedem Kriterium pro Variante eine Durchschnittsnote. Diese Note ist entsprechend des Anteils der Technologie am Wärmebedarf gewichtet. Im obigen Beispiel wird also die Note der Pelletanlage und der des Gaskessels zu je 50 % gewichtet, da beide zu jeweils 50 % den Wärmebedarf decken. Um nun zu einem Gesamtergebnis zu gelangen, werden die Kriterien ebenfalls gewichtet. So könnte z.B. das Kriterium „Investitionskosten“ mit 70 % und das Kriterium „CO₂-Fußabdruck“ mit 30 % gewichtet werden. Die Gewichtung wird mit den jeweiligen Durchschnittsnoten der Kriterien verrechnet, womit man ein Gesamtergebnis erhält. Im Beispiel würde das Gesamtergebnis der Variante wie folgt berechnet werden:

- Kriterium Investitionskosten: $1,0 \times 50\% (\text{Gas}) + 4,0 \times 50\% (\text{Pellet}) = 2,5$
- Kriterium CO₂-Fußabdruck: $5,0 \times 50\% (\text{Gas}) + 2,0 \times 50\% (\text{Pellet}) = 3,5$

- Gesamtergebnis (bei 2 Kriterien): $2,5 \times 70\%$ (Investitionskosten) + $3,5 \times 30\%$ (CO₂) = 2,8

Das Gesamtergebnis dieser Variante kann dann mit dem Gesamtergebnis anderer Varianten verglichen werden. So kann abgeschätzt werden, welches Nahwärmekonzept am besten für das Baugebiet geeignet ist. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte des Variantenvergleichs für den Stadtkern in Waldenbuch durchgeführt:

4.2 Durchführung Variantenvergleich

4.2.1 Aufstellung der Varianten

Die Festlegung der Varianten wurde im Kick-Off-Termin am 19.05.2022 gemeinsam mit den Ansprechpartnern der Gemeinde durchgeführt. Hierbei hat man sich auf folgende Varianten geeinigt:

Tabelle 1: Aufstellung Nahwärmekonzepte für Variantenvergleich

Nr.	Nahwärmekonzept/Variante	Wärmeversorgung	Stromversorgung	Standort Heizzentrale
1) ²	Kein Nahwärmenetz (Einzelversorgung über Gas-Kessel) Kurz: Kein Nahwärmenetz	Gas-Kessel	Öffentliches Netz	keine
2)	Nahwärmenetz mit Blockheizkraftwerk (H ₂ -ready) Kurz: Nahwärmenetz Wasserstoff	Blockheizkraftwerk, Gas Spitzenlastkessel	Blockheizkraftwerk, öffentliches Netz	Innerhalb des Stadtkerns
3)	Nahwärmenetz mit Holzversorgung und Photovoltaik Kurz: Nahwärmenetz Holz	Hackschnitzel-/Pelletkessel, Gas Spitzenlastkessel	Photovoltaik, öffentliches Netz	Außerhalb des Stadtkerns
4)	Nahwärmenetz mit Luft-Wasser-Wärmepumpen Kurz: Nahwärmenetz Luft-Wärmepumpe	Luftwärmepumpe; Gas Spitzenlastkessel	Photovoltaik, öffentliches Netz	Innerhalb des Stadtkerns
5)	Klimaneutrales Nahwärmenetz mit Grundwasser-Wasser-Wärmepumpen Kurz: Nahwärmenetz Grundwasser-Wärmepumpe	Grundwasser-Wärmepumpe, Hackschnitzel-/Pelletkessel	Photovoltaik, öffentliches Netz	Außerhalb des Stadtkerns

Im Folgenden werden die einzelnen Varianten genauer beschrieben:

² Dies stellt die Referenz-Variante dar

1) Variante 1/Referenzvariante: Kein Nahwärmenetz

Variante 1 stellt die Referenzvariante dar. In dieser Variante gibt es kein Nahwärmenetz, die Gebäude werden dezentral mit einer eigenen Heizung mit Wärme und durch das öffentliche Netz mit Strom versorgt. Anhand der Variante soll verglichen werden, ob für ein Nahwärmenetz überhaupt ein Potenzial besteht oder ob eine dezentrale Versorgung die bessere Lösung darstellt. Ältere Bestandsgebäude werden üblicherweise mit einem Gas- oder Öl-Brennwertkessel dezentral beheizt. Die Bestandsaufnahme zeigte, dass es sich bei den fünf untersuchten Gebäuden ausschließlich um Gas-Kessel handelt. Dementsprechend stellt die Versorgung über Gas-Kessel die Referenzvariante dar.

2) Variante 2: Nahwärmenetz mit Blockheizkraftwerk (H₂-ready)

Die zweite Variante stellt eine klassische bzw. konventionelle Art der Nahwärmeversorgung dar, wie sie in bestehenden Nahwärmenetzen sehr oft vorzufinden ist. Hierbei wird über ein Blockheizkraftwerk (BHKW) sowohl Wärme als auch Strom erzeugt (vgl. Abbildung 5). Die Wärme wird in das Nahwärmenetz und der Strom größtenteils in das öffentliche Stromnetz eingespeist, wodurch entsprechende Vergütungen erlöst werden können.

Solche Nahwärmekonzepte sind etabliert, technisch einfach umzusetzen und vergleichsweise kostengünstig in der Anschaffung. Jedoch wird in dieser Variante zu 100 % der fossile Energieträger Erdgas für die Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt. Daher ist diese Variante höchstens mittelfristig eine Lösung, langfristig muss das System jedoch auf regenerative Energien umgestellt werden. Zudem besteht hier ein hohes Preisrisiko, da sowohl der Erdgaspreis als auch die damit einhergehende CO₂-Bepreisung zukünftig voraussichtlich stark steigen werden. Da ein Nahwärmenetz eine Infrastruktur darstellt, die über einen langen Zeitraum bestehen wird und klar ist, dass ein rein fossil betriebenes Netz nicht zukunftsfähig ist, stellt eine solche Investition ein hohes Risiko dar („Lock-in“-Effekt).

Daher liegt die Besonderheit in diesem Fall darin, dass das verwendete BHKW bereits die technischen Voraussetzungen erfüllen soll, zum gegebenen Zeitpunkt auf den Betrieb durch Wasserstoff umstellbar zu sein. Aktuell stellt Wasserstoff zwar eine klimaneutrale, aber auch eine sehr teure Lösung in Bezug auf die laufenden Kosten dar. Zudem bringt die Speicherung des benötigten Wasserstoffes im Stadtkern einige Herausforderungen mit sich. Der Speicher müsste in diesem Fall außerhalb der Stadt liegen und wäre auf zusätzliche Transportinfrastruktur angewiesen.

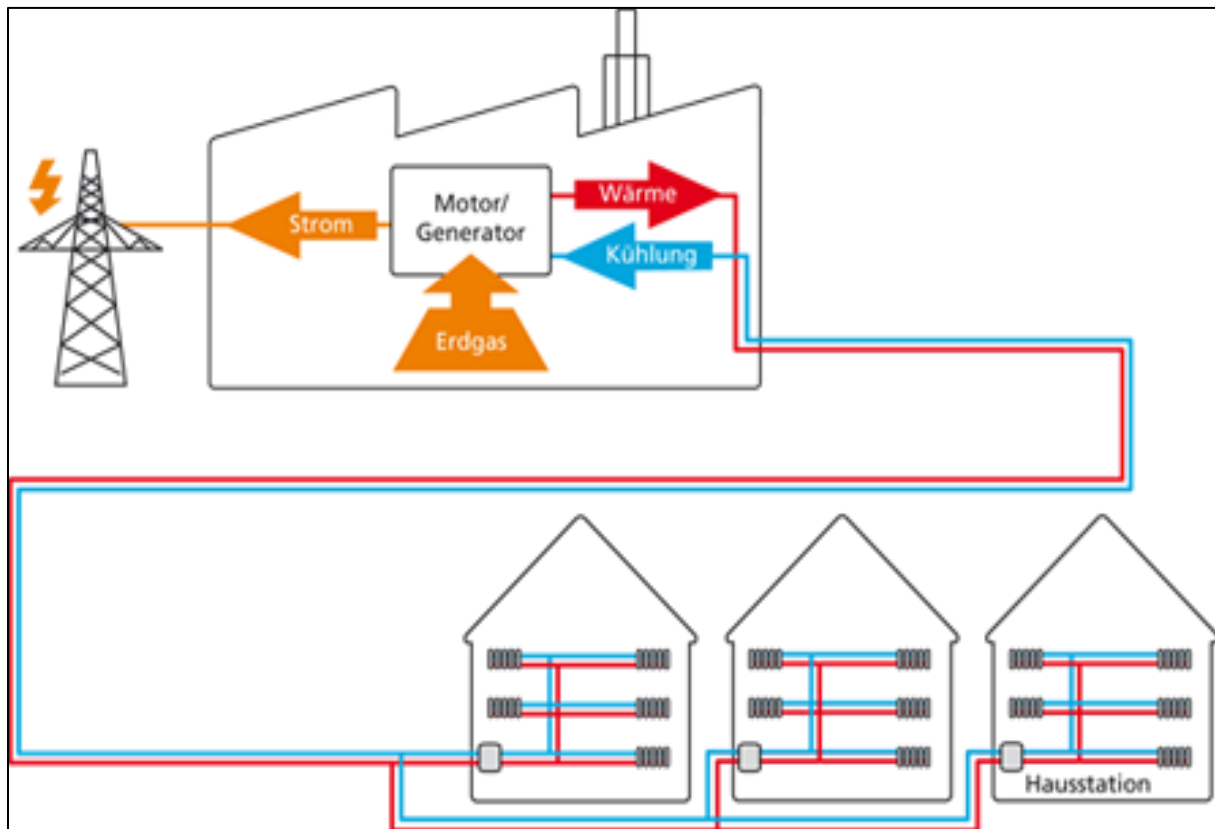


Abbildung 5: Schema Variante 2: BHKW (H2-ready)³

Für die Berechnung im Variantenvergleich wird die zukünftige Perspektive eingenommen, sodass angenommen wird, dass das BHKW grünen Wasserstoff als Energieträger einsetzt.

3) Variante 3: Nahwärmenetz mit Holzversorgung und Photovoltaik

Die dritte Variante stellt, abgesehen vom Einsatz eines Gas-Brennwertkessels für Spitzenlasten, eine klimaneutrale Variante dar, da ausschließlich der regenerative Energieträger Holz zur Wärmeerzeugung eingesetzt wird. Holz ist umso nachhaltiger, je regionaler es bezogen wird. Am ökologischsten ist es, Restholz zu verwenden, welches nicht anderweitig eingesetzt werden kann. Somit müsste kein Wald dediziert für das Nahwärmenetz abgeholzt werden.

Holz hackschnitzelkessel werden ebenfalls häufig in Nahwärmenetzen eingesetzt. Neben dem Kessel ist hier noch die Holzinfrastruktur zu berücksichtigen, welche mit erhöhtem Platzbedarf und Investitionskosten verbunden ist. Darunter fällt zum Beispiel ein Hack-

³ <https://www.swhl.de/travewaerme-2/>

schnitzelbunker, ggf. eine Trocknungsanlage für die Hackschnitzel und eine entsprechende Raumaustragung (z.B. Schubboden oder Förderschnecke), um die Hackschnitzel vom Bunker zum Kessel zu befördern. Außerdem spielt das Thema Abgas eine wichtige Rolle, da bei der Holzverbrennung oftmals giftige oder umweltschädliche Abgase und Feinstaub entstehen. Daher sind hierfür aufwändige Abgas- und Aschekonzepte notwendig.

Aus technischer Sicht ist ebenfalls zu beachten, dass die Hackschnitzelanlagen sehr sensibel auf z.B. verschiedene Holzqualitäten reagieren. Dadurch kommt es nicht selten zu Ausfällen oder Störungen, weshalb die Anlagen regelmäßig überwacht und gewartet werden müssen.

Damit Holz tatsächlich als nachhaltiger Energieträger eingestuft werden kann, sollte dieser aus regionaler Forstwirtschaft bezogen werden und möglichst aus stofflich nicht nutzbaren Reststoffen bestehen.

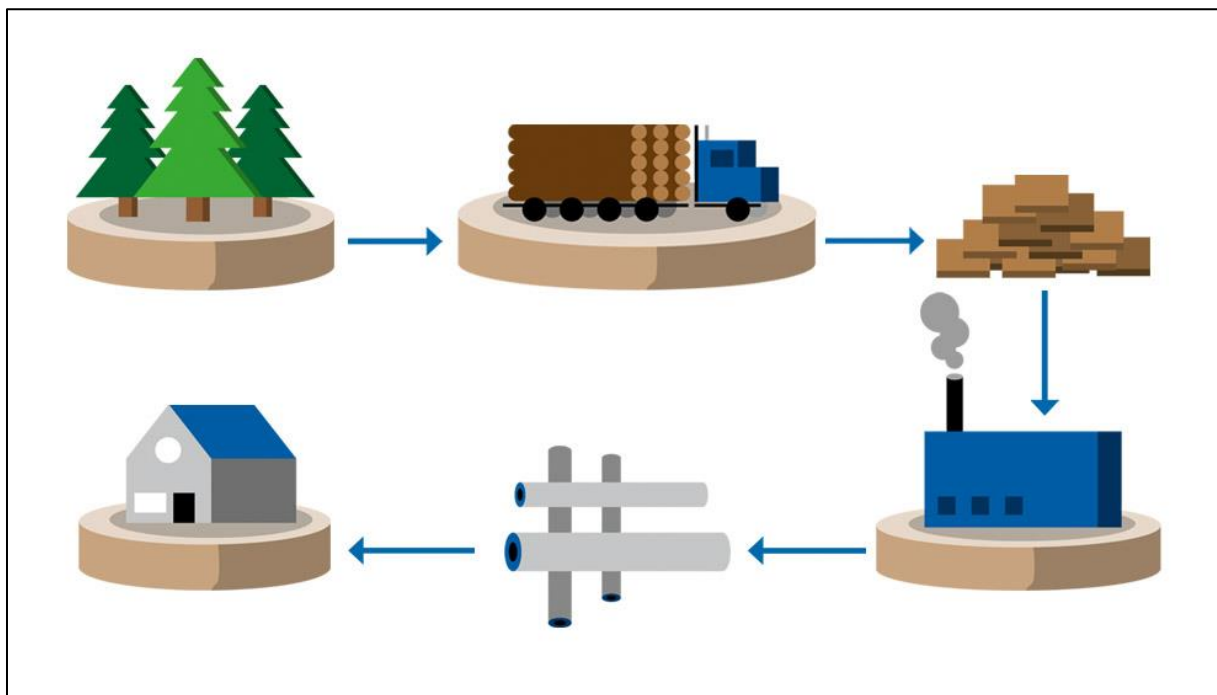


Abbildung 6: Schema Variante 3: Holzversorgung⁴

⁴ https://lounge.stadtwerk-am-see.de/locale_article/aus-holz-wird-waerme/

4) Variante 4: Nahwärmenetz mit Luft-Wasser-Wärmepumpe

In der vierten Variante wird primär eine Luft-Wasser-Wärmepumpe (kurz: Luft-Wärmepumpe) zur Wärmeerzeugung eingesetzt. Dabei nutzt die Pumpe die Außenluft, um das Wasser für die Heizung zu erwärmen. Luft-Wasser-Wärmepumpen werden oftmals dezentral verwendet, sodass jedes Gebäude seine eigene Wärmepumpe besitzt. Allerdings kann auch eine große Pumpe zentral für ein Nahwärmenetz verwendet werden. Die Funktionsweise einer Luft-Wasser-Wärmepumpe ist in Abbildung 7 dargestellt.

Durch die stark schwankende Wärmequelle Luft (je nach Jahreszeit zwischen -10°C und 30°C) können die dezentralen Wärmepumpen weniger effizient als zum Beispiel Sole-/Wasser-Wärmepumpen betrieben werden und arbeiten meist mit einer Jahresarbeitszahl (JAZ) zwischen 2,5 - 3,5. Dies bedeutet, dass mit dem Einsatz von 1 kWh Strom insgesamt 2,5 bis 3,5 kWh Wärme generiert werden können.

Beispiel: Bei einem Wärmebedarf von 12.000 kWh/a und einer JAZ von 3,0 benötigt die Wärmepumpe einen Stromeinsatz von 4.000 kWh/a. Die verbleibende Wärmemenge (8.000 kWh/a) wird der Umwelt, in dem Fall der Luft, entzogen.

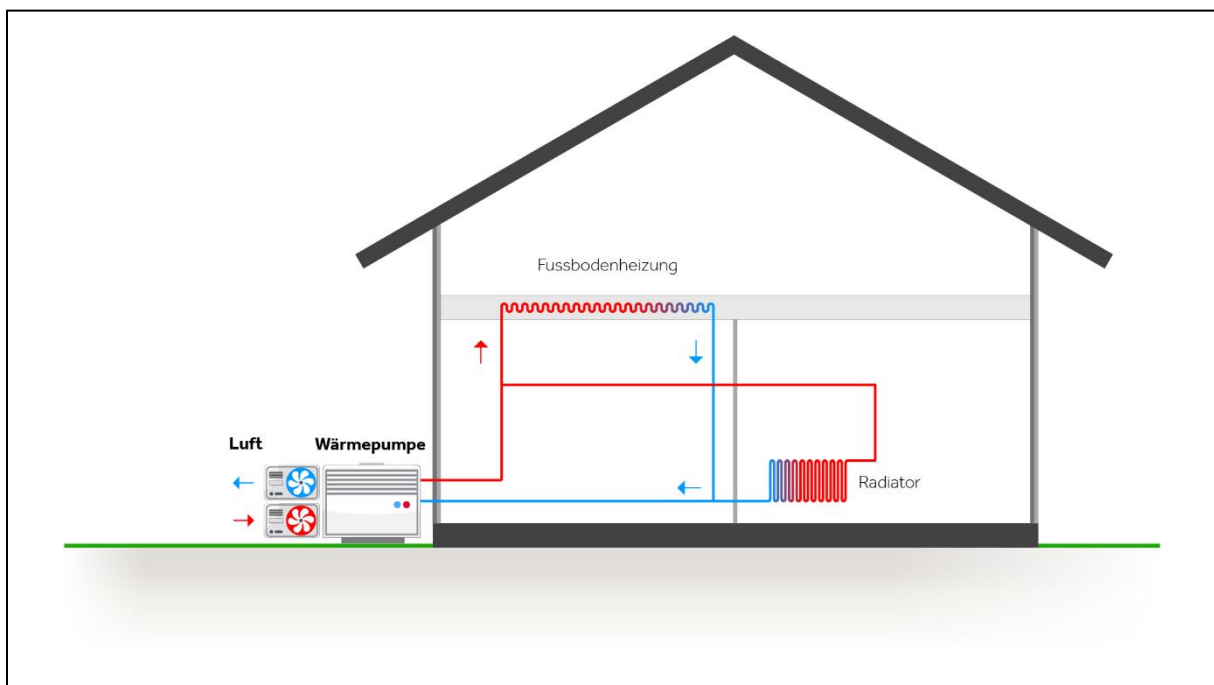


Abbildung 7: Schema Variante 4: Luftwärmepumpe⁵

⁵ <https://meineheizung.ch/de/luft-wasser-w%C3%A4rmepumpe.html>

5) Variante 5: Klimaneutrales Nahwärmenetz mit Grundwasser-Wasser-Wärmepumpen

Die fünfte Variante stellt die einzige komplett klimaneutrale Variante dar, da neben den durch Photovoltaik betriebenen Wärmepumpen ausschließlich der regenerative Energieträger Holz zur Wärmeerzeugung in der Spitzenlast eingesetzt wird. Eine Grundwasser-Wasser-Wärmepumpe (kurz: Grundwasser-Wärmepumpe) geht dabei nach demselben Prinzip vor wie eine gewöhnliche Luft-Wärmepumpe. Allerdings wird dabei nicht die Wärme aus der Luft sondern aus dem Grundwasser des Erdreichs verwendet. Das bietet den Vorteil, dass die Wärmepumpen deutlich effizienter betrieben werden können als klassische Luft-Wärmepumpen. Der Grund dafür liegt darin, dass das Grundwasser das gesamte Jahr über eine konstante Temperatur besitzt, die in der Regel bei 7 - 14 °C liegt. Dementsprechend muss die Wärmepumpe an sehr kalten Tagen die Temperatur nicht von Minusgraden, sondern von 7 - 14 °C auf die Wunschtemperatur anheben. Eine Voraussetzung für die Umsetzbarkeit dieser Variante ist jedoch, dass die geologischen Gegebenheiten vor Ort stimmen und das Grundwasser sich zum Einsatz eignet.

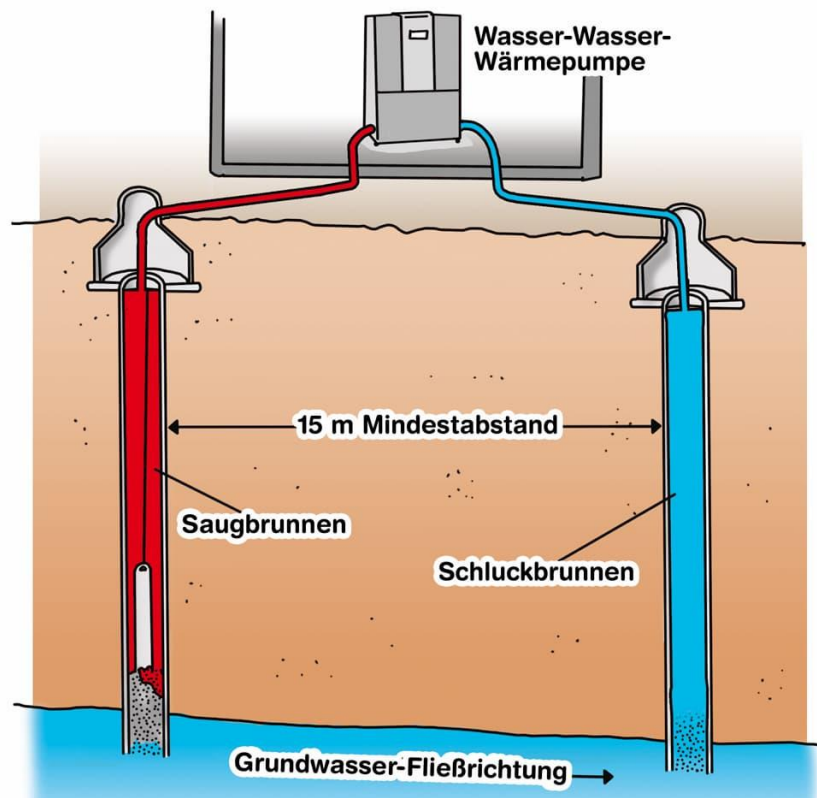


Abbildung 8: Schema Variante 5: Grundwasser-Wärmepumpe⁶

4.2.2 Kriterienauswahl und -gewichtung

Die in Kapitel 4.1 aufgestellten Varianten werden anhand des Variantenvergleichs einander gegenübergestellt. Um einen qualitativen Vergleich durchführen zu können, sind vorab geeignete Kriterien zu definieren sowie eine entsprechende Gewichtung der Kriterien vorzunehmen. Dies wurde ebenfalls am Kick-Off-Termin vom 19.05.2022 durchgeführt. Das Ergebnis ist in Tabelle 2 dargestellt.

⁶ <https://www.heizsparer.de/heizung/heizungssysteme/waermepumpe/wasser-wasser-waermepumpe>

Tabelle 2: Kriterien und Kriteriengewichtung

Nr.	Kriterium	Gewichtung
1	Investitionskosten	20 %
2	Laufende Kosten	30 %
3	CO ₂ -Emissionen	20 %
4	Autarkie/Eigenerzeugung	20 %
5	Soziale Akzeptanz	5 %
6	Innovationsgrad	5 %

Insgesamt wurde festgelegt, dass die Kriterien Investitionskosten, Laufende Kosten, CO₂-Emissionen, Autarkie/Eigenerzeugung, Soziale Akzeptanz und Flächenbedarf betrachtet werden sollen. Hierbei werden die Kriterien Laufende Kosten und CO₂-Emissionen am höchsten gewichtet. Die Kriterien Soziale Akzeptanz und Innovationsgrad werden verhältnismäßig am geringsten gewichtet.

Im Folgenden werden die einzelnen Kriterien genauer beschrieben:

1) Investitionskosten

Unter den Investitionskosten wird die Summe der Ausgaben verstanden, die für den Erwerb aller Komponenten der jeweiligen Variante anfallen. Diese beinhalten insbesondere:

- Kosten Energieerzeuger (BHKW, PV, Wärmepumpe, etc.)
- Kosten Leitungen inklusive Übergabestationen, Pufferspeicher, Pumpen, Mess-/Steuer-/Regelungstechnik (MSR)-Technik, etc.
- Kosten für Tiefbau
- Erschließungskosten (z. B. für Grundwasserkollektoren)
- Genehmigungskosten
- Kosten für Planung (Ingenieursdienstleistungen)
- Montage- und Installationskosten

Von diesen Kosten werden ggf. Kosten für die Förderung der jeweiligen Komponenten abgezogen. Die Kosten werden hierbei aus volkswirtschaftlicher Perspektive betrachtet. D.h. es spielt in dieser Betrachtung keine Rolle, wer die Kosten trägt, da dies zum jetzigen Zeitpunkt noch offen ist. In Abbildung 9 ist die Bewertungsskala für die Investitionskosten zum Vergleich dargestellt:

Note	Technologie
1	Gas-Kessel
2	
3	
4	
5	
6	Holzgas-BHKW

Abbildung 9: Bewertungsskala Investitionskosten

In diesem Fall würde beispielsweise ein einfacher Gas-Kessel mit der Note 1 und ein teures Holzgas-BHKW mit der Note 6 bewertet werden. Gas-Kessel sind kostengünstig in der Anschaffung und einfach zu installieren. Holzgas-BHKWs hingegen sind technisch sehr komplexe Systeme, in denen aus Holz oder anderer Biomasse über thermochemische Verfahren sog. Holzgas erzeugt wird. Dieses wird im zweiten Schritt im BHKW verbrannt und in

Strom und Wärme umgewandelt. Solche Spezialanlagen sind i.d.R. sehr teuer in der Anschaffung und aufwändig in der Installation.

2) Laufende Kosten

Unter den laufenden Kosten werden alle für den Betrieb der Anlagen erforderlichen Kosten verstanden. Im Wesentlichen sind die folgenden aufgeführten Kosten:

- Brennstoff (z.B. Gas, Strom oder Holz)
- Wartungskosten- und Instandhaltungskosten für alle Komponenten im System
- Kosten interner Aufwand (z. B. jährliche Meldungen, Steuer, Versicherung, etc.)

Da sich insbesondere die Brennstoffkosten in den nächsten Jahren stark verändern werden, wird die Betrachtung mit prognostizierten Energiepreisentwicklungen über einen Zeitraum von 20 Jahren durchgeführt.

Da in manchen Varianten auch laufende Erlöse erzielt werden, werden diese von den laufenden Kosten abgezogen, um die Vergleichbarkeit sicherzustellen. Dies ist z.B. für Varianten relevant, in denen ein BHKW Strom in das öffentliche Netz einspeist und hierfür Vergütungen erzielt.

Auch dieses Kriterium wird aus volkswirtschaftlicher Perspektive betrachtet.

In Abbildung 10 ist die Bewertungsskala für die laufenden Kosten zum Vergleich dargestellt:

Note	Technologie
1	Photovoltaik-Anlage
2	
3	
4	
5	
6	Wasserstoff-Brennstoffzelle

Abbildung 10: Bewertungsskala Laufende Kosten

Eine PV-Anlage weist nur sehr geringe laufende Kosten auf, da sie kostenlose Sonnenenergie nutzt und nicht sehr wartungsintensiv ist. Eine wasserstoffbetriebene Brennstoffzelle hingegen weist aufgrund des hohen Wasserstoff-Preises sehr hohe Brennstoffkosten auf und ist somit im Vergleich zu anderen Technologien deutlich teurer. Außerdem sind solche Anlagen bisher nicht etabliert und wenig im Einsatz, weshalb mit einem hohem Wartungsaufwand zu rechnen ist.

3) Autarkie/Eigenerzeugung

Der Autarkiegrad beschreibt, wie viel Prozent des im Quartier benötigten Energiebedarfs (Strom und Wärme) über die Eigenerzeugung vor Ort (z.B. Strom durch ein BHKW oder PV, Wärme durch Nutzung Umweltenergie über Wärmepumpen) gedeckt werden. Je höher dieser Anteil ist, desto unabhängiger oder „autarker“ ist das Quartier von Strom- und Gasversorgern und anderen Energielieferanten (z.B. Öl, Pellets).

Als Bilanzgrenze wird hierbei das Quartier betrachtet. Das bedeutet, dass alle Energie, die im Quartier selbst erzeugt oder bereitgestellt wird (z.B. über PV auf den Dächern der Gebäude oder Nutzung von Umweltwärme über Wärmepumpen) als autark betrachtet wird. Energieträger, die von außerhalb bezogen werden (Strom oder Gas über das öffentliche Netz, Holz, etc.) werden hingegen als nicht autark bewertet.

Abbildung 11 ist die Bewertungsskala für den Autarkiegrad zum Vergleich dargestellt:

Note	Technologie
1	Photovoltaik-Anlage
2	
3	
4	
5	
6	Gas-Kessel

Abbildung 11: Bewertungsskala Autarkiegrad

Auch bei diesem Kriterium schneidet die PV-Anlage hier sehr gut ab, da sie Strom aus lokal verfügbarer Sonnenenergie eigenerzeugt und damit Gebäude (teil)autark mit Energie versorgen kann. Der Autarkiegrad könnte sogar noch durch einen Batterie-Speicher erhöht werden. Dieser könnte dann die Energie, welche an sonnigen Mittagsstunden erzeugt wird, speichern und abends, wenn es dunkel ist, wieder zur Verfügung stellen.

Gas-Kessel hingegen, welche Erdgas aus der Leitung beziehen, das ggf. aus verschiedenen Regionen der Welt importiert wurde, weisen einen sehr schlechten Autarkiegrad auf. Dies gilt auch für andere fossile Energieträger, wie z.B. Öl.

4) CO₂-Emissionen

Das Kriterium CO₂-Emissionen berücksichtigt den Einfluss des Energieverbrauchs auf das Klima. Insbesondere durch die Verbrennung fossiler Energieträger wie Erdgas entstehen CO₂-Emissionen, während durch die Nutzung regenerativer Energieträger wie Holz oder Umweltwärme nur geringe Treibhausgase emittiert werden. Die CO₂-Emissionen werden auf Basis von Emissionsfaktoren für die verschiedenen Energieträger berechnet. So wird für Erdgas zum Beispiel ein Emissionsfaktor von 0,24 kg CO₂/kWh angesetzt. Dies bedeutet, dass pro verbrannter kWh Erdgas für ein BHKW oder einen Gaskessel 0,24 kg CO₂ in die Atmosphäre emittiert werden. Hierbei werden nicht nur die Emissionen aus der direkten Verbrennung sondern auch die der Vorkette (Förderung und Transport von Erdgas) berücksichtigt. Dies gilt auch für die restlichen Energieträger.

In Abbildung 12 ist die Bewertungsskala für den CO₂-Fußabdruck zum Vergleich dargestellt:

Note	Technologie
1	Abwärme
2	
3	
4	
5	
6	Erdgas-/Ölheizung

Abbildung 12: Bewertungsskala CO₂-Emissionen

Die Nutzung von lokal verfügbarer Abwärme ist sehr klimafreundlich und effizient. Durch die Verwendung von Abwärme, welche ansonsten ungenutzt bleiben würde, muss Energie nicht aufwändig erzeugt werden, sodass ein minimaler CO₂-Fußabdruck entsteht,

Durch den Einsatz von fossilen Energieträgern wie Öl oder Gas werden in einer klassischen Heizung hingegen, sehr hohe CO₂-Emissionen emittiert. Daher werden diese mit einer „6“ bewertet.

5) Soziale Akzeptanz

Unter sozialer Akzeptanz wird in diesem Zusammenhang die Einstellung der Bevölkerung gegenüber verschiedenen Nahwärmekonzepten verstanden. Da die Energieerzeugung oftmals Auswirkungen auf die Umwelt und die Gesellschaft hat, wird dieser Punkt ebenfalls betrachtet. So ist z.B. die Zustimmung für Windkraft oder Biogasanlagen in der Nähe von Quartieren tendenziell geringer als von z.B. für PV. Die Bewertung der sozialen Akzeptanz wird in dieser Arbeit auf Basis einer subjektiven Einschätzung mehrerer Experten getroffen. Sie ist aber auch stark von der Einstellung der lokalen Bevölkerung abhängig. Da die hier betrachteten Varianten jedoch keine „kritischen“ Energieerzeugungstechnologien beinhalten, werden sich die Bewertungen der jeweiligen Varianten nicht zu sehr voneinander unterscheiden.

In Abbildung 13 ist die Bewertungsskala für die soziale Akzeptanz zum Vergleich dargestellt:

Note	Technologie
1	Photovoltaik-Anlage (Dach)
2	
3	
4	
5	
6	Nah gelegener Windpark

Abbildung 13: Bewertungsskala soziale Akzeptanz

Diese ist erfahrungsmäßig für z.B. PV-Anlagen, die auf dem Dach installiert werden, sehr hoch. PV-Anlagen auf Dächern haben keinen negativen Einfluss auf die Landschaft oder Natur zur Folge und emittieren keinen Lärm oder Geruch, sodass sich die Bevölkerung daran i.d.R. nicht stört. Daher wird sie hier mit einer 1 bewertet. Windparks oder auch Biogasanlagen in der Nähe von Wohngebieten werden hingegen mit einer 6 bewertet, da diese einen Landschaftseingriff zur Folge haben und sowohl optisch als auch in Bezug auf Lärm bzw. Geruch von der Bevölkerung oftmals als störend wahrgenommen werden.

6) Innovationsgrad

Der Innovationsgrad gibt an, wie neuartig die untersuchte Technologie ist. Damit soll der graduelle Unterschied gegenüber dem bisherigen Zustand gemessen werden.

In Abbildung 14 ist die Bewertungsskala für den Innovationsgrad zum Vergleich dargestellt:

Note	Technologie
1	H2-Brennstoffzellen BHKW
2	
3	
4	
5	
6	Gas-Brennwert Kessel

Abbildung 14: Bewertungsskala Innovationsgrad

Generell schneiden dabei konventionelle Wärmeerzeuger, die auf fossile Brennstoffe angewiesen sind, sehr schlecht ab, während Lösungen, die auf Strom, Biomasse oder Wasserstoff zurückgreifen, besser abschneiden. Innerhalb der innovativeren Technologien sind jedoch ebenfalls Unterscheidungen zu treffen. So kann eine Grundwasser-Wärmepumpe aufgrund der komplexeren Technologie sowie komplexeren Genehmigungsverfahren als innovativer eingeschätzt werden als eine gewöhnliche Luft-Wärmepumpe.

4.3 Ergebnisse Variantenvergleich

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Variantenvergleichs zunächst für jedes Kriterium einzeln und anschließend im Gesamtergebnis dargestellt und erläutert:

4.3.1 Investitionskosten

Im Variantenvergleich haben die verschiedenen Nahwärmekonzepte beim Kriterium Investitionskosten folgendermaßen abgeschnitten (vgl. Abbildung 15):

Variante	Investition
	20%
Variante 1: Kein Nahwärmenetz (Einzelversorgung über Gas-Kessel)	1
Variante 2: Nahwärmenetz mit Wasserstoff-BHKW und Gas-Spitzenlast	5
Variante 3: Nahwärmenetz mit Holz, Gas-Spitzenlast und PV	4
Variante 4: Nahwärmenetz mit Luftwärmepumpen, Gas-Spitzenlast und PV	3
Variante 5: Nahwärmenetz mit Erdsonden-Wärmepumpen, Holz-Spitzenlast und PV	5

Abbildung 15: Ergebnis Investitionskosten

Insgesamt schneiden hier alle Nahwärme-Varianten (2 - 5) nicht sehr gut ab, da Nahwärmenetze i.d.R. immer mit hohen Investitionskosten verbunden sind. Daher scheidet die Referenzvariante 1 mit der Note 1 am besten ab, da hierfür (vorerst) keine Investitionskosten anfallen würden. Variante 2 und 5 sind die teuersten Varianten. Bei Variante 2 entstehen die Kosten vor allem durch die Anschaffung eines wasserstofffähigen Blockheizkraftwerks. Außerdem verursacht der Bau des Wärmenetzes zusätzlich Kosten. Bei Variante 5 fallen Kosten für die Bohrungen, für das Verlegen der Sonden, für die Netzleitungen und für die dezentrale Wärmepumpen-Heizungen an, sodass hier trotz der berücksichtigten Förderung die höchsten Investitionskosten anfallen.

Variante 3 hingegen schneidet mit einer „4“ etwas besser, aber trotzdem noch im eher schlechten Bereich ab, da die Holz-Infrastruktur (Kessel, Bunker, Raumaustragung, etc.) i.d.R. kostenintensiv ist. Hinzu kommen auch hier die Kosten für die Leitungen des Wärmenetzes.

Die günstigste untersuchte Variante eines Nahwärmenetzes stellt Variante 4 dar. Da für Luft-Wärmepumpen keine teure Erschließung (wie bei Grundwasser-Wärmepumpen) für die Wärmequelle erforderlich ist, weist sie in der Anschaffung geringere Investitionskosten

auf. Dennoch werden für den zu bedienenden Wärmebedarf sehr große Wärmepumpen benötigt, weshalb die Variante 4 mit der Note „3“ abschneidet.

4.3.2 Laufende Kosten

Das Ergebnis für das Kriterium „Laufende Kosten“ ist in Abbildung 16 dargestellt:

Variante	Laufende Kosten
	30%
Variante 1: Kein Nahwärmenetz (Einzelversorgung über Gas-Kessel)	5
Variante 2: Nahwärmenetz mit Wasserstoff-BHKW und Gas-Spitzenlast	6
Variante 3: Nahwärmenetz mit Holz, Gas-Spitzenlast und PV	3
Variante 4: Nahwärmenetz mit Luftwärmepumpen, Gas-Spitzenlast und PV	5
Variante 5: Nahwärmenetz mit Erdsonden-Wärmepumpen, Holz-Spitzenlast und PV	2

Abbildung 16: Ergebnis laufende Kosten

Variante 5 schneidet mit einer „2“ am besten ab. Dies liegt zum einen daran, dass eine Grundwasser-Wärmepumpe aufgrund der konstanten Wärme aus dem Erdreich deutlich energieeffizienter arbeiten kann als beispielsweise eine normale Luft-Wärmepumpe. Außerdem wird in dieser Variante kein Gas- sondern ein Holz-Spitzenlastkessel eingesetzt. Gaspreise sind aktuell sehr volatil und können in den nächsten Jahren weiterhin stark ansteigen. Außerdem werden sie durch die CO₂-Abgabe zusätzlich stark belastet, was bei Holz nicht der Fall ist.

Variante 3 schneidet dementsprechend mit einer „3“ ebenfalls verhältnismäßig gut ab, wenn auch etwas schlechter, da auch die Preise für Holz in den letzten Jahren deutlich gestiegen sind und hierfür durchaus große Mengen an Hackschnitzeln oder Pellets benötigt werden. Zusätzlich sind Hackschnitzelanlagen i.d.R. sehr wartungsintensiv.

Variante 1 und 4 schneiden mit einer „5“ sehr schlecht ab, was vor allem am hohem Wärmebedarf der untersuchten Gebäude liegt. In Bezug auf Variante 1 bedeutet das, dass eine große Menge an Gas bezogen werden muss, um jedes Gebäude einzeln mit einem Gas-kessel zu beheizen. In Bezug auf Variante 4 sorgen der große Wärmebedarf und die

schlechte Wärmedämmung für die Notwendigkeit von sehr hohen Vorlauftemperaturen, was die untersuchten Luft-Wärmepumpen ohne Sanierung unwirtschaftlich macht und die Stromkosten ansteigen lässt.

Variante 2 stellt die höchsten laufenden Kosten dar und wird daher für dieses Kriterium mit der Note „6“ bewertet. Wasserstoff ist aktuell der teuerste der untersuchten Energieträger und nur bedingt verfügbar.

4.3.3 Autarkiegrad

Die Ergebnisse für den Autarkiegrad sind in Abbildung 17 abgebildet:

Variante	Autarkiegrad
	20%
Variante 1: Kein Nahwärmenetz (Einzelversorgung über Gas-Kessel)	6
Variante 2: Nahwärmenetz mit Wasserstoff-BHKW und Gas-Spitzenlast	6
Variante 3: Nahwärmenetz mit Holz , Gas-Spitzenlast und PV	5
Variante 4: Nahwärmenetz mit Luftwärmepumpen , Gas-Spitzenlast und PV	3
Variante 5: Nahwärmenetz mit Erdsonden-Wärmepumpen , Holz-Spitzenlast und PV	1

Abbildung 17: Ergebnis Autarkiegrad

Die Variante 5 wird hier mit einer „1“ mit Abstand am besten bewertet. Das liegt daran, dass sie zum Großteil auf lokal verfügbare Energie aus dem Erdreich zurückgreift, um die Wärmepumpe möglichst effizient zu betreiben. Je kleiner die benötigte Menge an Strom für die Wärmepumpe ist, desto mehr davon kann autark mithilfe der zusätzlich geplanten PV-Anlagen gedeckt werden. Anders sieht das bei den Varianten 1, 2 und 3 aus, die in großen Mengen von den Energieträgern Erdgas, Wasserstoff oder Holz abhängig sind und daher per LKW oder per Leitung mit den Energieträgern versorgt werden müssen. Daher werden diese Varianten im Bereich Autarkie sehr schlecht bewertet.

4.3.4 CO₂-Emissionen

Die Ergebnisse für die Bewertung der CO₂-Emissionen ist in Abbildung 18 abgebildet:

Variante	CO ₂ -Fußabdruck
	20%
Variante 1: Kein Nahwärmenetz (Einzelversorgung über Gas-Kessel)	6
Variante 2: Nahwärmenetz mit Wasserstoff-BHKW und Gas-Spitzenlast	1
Variante 3: Nahwärmenetz mit Holz , Gas-Spitzenlast und PV	2
Variante 4: Nahwärmenetz mit Luftwärmepumpen , Gas-Spitzenlast und PV	3
Variante 5: Nahwärmenetz mit Erdsonden-Wärmepumpen , Holz-Spitzenlast und PV	1

Abbildung 18: Ergebnis CO₂-Emissionen

Die Varianten 2 und 5 schneiden hier mit einer „1“ am besten ab. Für Variante 2 würde mit grünem Wasserstoff ein komplett klimaneutraler Energieträger zum Einsatz kommen, der lediglich für die Spitzen durch die vorhandenen Gas-Kessel unterstützt wird. Bei Variante 5 wird die Umweltenergie aus dem Quellwasser im Erdreich genutzt, um die Wärmepumpe effizient zu betreiben. Da Luft-Wärmepumpen ineffizienter als Grundwasser-Wärmepumpen arbeiten und dementsprechend mehr Strom verbrauchen, schneidet Variante 4 mit einer „3“ schlechter ab. Holz wird i.d.R. ebenfalls klimaneutral eingestuft und wird deshalb mit „gut“ bewertet. Allerdings entstehen in der Vorkette (Abholzung, Holzbearbeitung, Transport) ebenfalls Emissionen. Die Variante 4 wird dementsprechend mit einer „2“ bewertet.

Am schlechtesten wird das fossile Nahwärmenetz (Variante 1) bewertet, da hier lediglich fossile Energieträger eingesetzt werden, wodurch hohe CO₂-Emissionen entstehen.

4.3.5 Soziale Akzeptanz

Die Ergebnisse für das Kriterium „Soziale Akzeptanz“ sind in Abbildung 19 dargestellt.

Variante	Soziale Akzeptanz
	5%
Variante 1: Kein Nahwärmenetz (Einzelversorgung über Gas-Kessel)	1
Variante 2: Nahwärmenetz mit Wasserstoff-BHKW und Gas-Spitzenlast	4
Variante 3: Nahwärmenetz mit Holz , Gas-Spitzenlast und PV	3
Variante 4: Nahwärmenetz mit Luftwärmepumpen , Gas-Spitzenlast und PV	2
Variante 5: Nahwärmenetz mit Erdsonden-Wärmepumpen , Holz-Spitzenlast und PV	2

Abbildung 19: Ergebnis soziale Akzeptanz

Insgesamt schneidet bei der sozialen Akzeptanz keine Variante besonders schlecht ab, da keine „kritischen“ Technologien wie Windkraftanlagen oder Biogasanlagen in den Konzepten vorgesehen sind.

Generell gilt: Je geringer der Einfluss und die direkten Auswirkungen der Energieerzeugung (z. B. Schall, Geruch, Optik) auf die Bewohner ist, desto besser. Da Holzinfrastruktur sehr sichtbar ist und bei der Verbrennung von Holz große Abgasfahnen entstehen können, wird dieses oftmals kritisch betrachtet. Dies kommt v.a. in Variante 3, aber auch in Variante 5 (Holz-Kessel als Redundanz) zum Tragen.

Klimafreundliche Wärmeerzeuger wie Wärmepumpen hingegen erfahren i.d.R. eine sehr hohe Akzeptanz. Hier entstehen keine Abgase, Gerüche oder Feinstaub, sodass die Bewohner dadurch nicht beeinträchtigt werden. Daher schneiden die Varianten 4 und 5 hier gut ab. Einzig das Thema Lärm, kann hier eine Rolle spielen, was bei Variante 5 aufgrund des Standortes der Heizzentrale außerhalb des Stadtkerns jedoch unkritisch zu bewerten ist. Bei Variante 4 wäre eine zentrale Luft-Wärmepumpe im Stadtkern lokalisiert und könnte somit auf Widerspruch treffen. Variante 2 schneidet hier am schlechtesten ab, da hier die Speicherung von Wasserstoff im Stadtkern als kritisch betrachtet wird. Da Wasserstoff in gasförmigen Zustand unter hohem Druck steht, müssen strikte Anforderungen an die Speicherung erfüllt werden. Auch die Anlieferung des Wasserstoffs per LKW wirkt sich störend aus, da v.a. im Winter regelmäßige Lieferungen notwendig wären. Hinzu kommt, dass Was-

serstoff in der Bevölkerung oftmals als gefährlicher und explosiver Energieträger wahrgenommen wird. Sollte der Wasserstoff zukünftig aus der Leitung kommen, wäre die Akzeptanz besser zu bewerten. Dies ist im Moment jedoch noch nicht absehbar.

Variante 1 schneidet sehr gut an, da hier keine Auswirkungen durch Optik, Lärm oder Geruch wahrnehmbar sind. Zudem obliegt die Hoheit der Heizung beim Gebäudeeigentümer, was bei einem Nahwärmenetz nicht der Fall wäre. Da es sich hier jedoch um öffentliche Gebäude handelt, wird dieser Punkt nicht gewertet.

Insgesamt handelt es sich hier jedoch um eine subjektive Einschätzung. Die tatsächliche soziale Akzeptanz ist in der Realität stark von der Bevölkerung vor Ort abhängig.

4.3.6 Innovationsgrad

Der Innovationsgrad der jeweiligen Konzepte wird in Abbildung 20 gegenübergestellt:

Variante	Innovationsgrad
	5%
Variante 1: Kein Nahwärmenetz (Einzelversorgung über Gas-Kessel)	6
Variante 2: Nahwärmenetz mit Wasserstoff-BHKW und Gas-Spitzenlast	1
Variante 3: Nahwärmenetz mit Holz , Gas-Spitzenlast und PV	3
Variante 4: Nahwärmenetz mit Luftwärmepumpen , Gas-Spitzenlast und PV	3
Variante 5: Nahwärmenetz mit Erdsonden-Wärmepumpen , Holz-Spitzenlast und PV	2

Abbildung 20: Ergebnis Innovationsgrad

Beim Innovationsgrad schneidet die Variante 2 mit einer „1“ am besten ab. Wasserstoff-BHKWs sind aktuell noch nicht stark verbreitet, da sie große Herausforderungen an die Beschaffung stellen. Die Herstellung von grünem Wasserstoff ist noch sehr kostenintensiv und noch nicht gut genug ausgebaut, um Wasserstoff in großen Mengen bereitzustellen. Am zweitbesten wird die Variante 5 mit einer „2“ bewertet, da kalte Nahwärmenetze mit Nutzung von Grundwasser eine effiziente und moderne Art der Wärmeversorgung darstellen. Am schlechtesten schneidet die dezentrale Versorgung über Erdgas, also Variante 1, ab. Diese Variante stellt die Heiztechnik der Vergangenheit dar.

4.3.7 Gesamtergebnis

Das sortierte Gesamtergebnis ist in Abbildung 21 zu sehen. Hier sind die Einzelbewertungen der jeweiligen Kriterien sowie das gewichtete Gesamtergebnis dargestellt:

Bewertung Energiekonzepte im Variantenvergleich							
Variante	Investition	Laufende Kosten	Autarkiegrad	CO ₂ -Fußabdruck	Soziale Akzeptanz	Innovationsgrad	SUMME gewichtet
	20%	30%	20%	20%	5%	5%	100%
Variante 5: Nahwärmenetz mit Erdsonden-Wärmepumpen , Holz u. PV	5	2	1	1	2	2	2
Variante 3: Nahwärmenetz mit Holz , Gas-SLK und PV	4	3	5	2	3	3	3
Variante 4: Nahwärmenetz mit Luftwärmepumpen , Gas-SLK und PV	3	4	4	3	2	3	3
Variante 2: Nahwärmenetz mit Wasserstoff-BHKW und Gas-SLK	6	6	6	1	3	1	5
Variante 1: Kein Nahwärmenetz (Einzelversorgung über Gas-Kessel)	1	5	6	6	1	6	5

SLK= Spitzenlastkessel; PV= Photovoltaik

Abbildung 21: Gewichtetes Gesamtergebnis⁷

Im Gesamtergebnis zeigt sich, dass die Variante 5 mit einer Gesamtbewertung von „gut“ am besten abschneidet. Variante 3 und 4 werden mit „befriedigend“ bewertet und die Varianten 1 und 2 gehen mit der Bewertung „mangelhaft“ als Verlierer hervor.

Jede Variante weist Kriterien auf, in denen sie gut oder schlecht abschneidet. Auffällig ist jedoch, dass Variante 5 lediglich im Bereich der Investitionskosten mit einer „5“ abschneidet und in allen anderen Bereich im guten oder sogar sehr guten Bereich liegt.

Einen entscheidenden Einfluss auf das Gesamtergebnis hat die Gewichtung. Daher wird im Folgenden das Ergebnis durch eine Sensitivitätsanalyse mit unterschiedlichen Gewichtungen überprüft.

4.4 Sensitivitätsanalyse

Im Folgenden sollen zwei Szenarien betrachtet werden: Im Szenario 1 „Kosten“ werden v.a. die Investitionskosten aber auch die laufenden Kosten hoch gewichtet. Im zweiten Szenario „Klima“ wird das Kriterium CO₂-Emissionen besonders stark gewichtet:

4.4.1 Szenario 1: „Kosten“

Für das erste Szenario wird folgende Gewichtung (vgl. Tabelle 3) vorgenommen:

⁷ Hinweis: In der Darstellung werden die Werte gerundet dargestellt. Im Berechnungstool wird mit exakten Werten gerechnet, weshalb es zu leichten Abweichungen kommen kann.

Tabelle 3: Kriteriengewichtung Szenario 1: „Kosten“

Nr.	Kriterium	Gewichtung
1	Investitionskosten	50 %
2	Laufende Kosten	30 %
3	CO ₂ -Emissionen	5 %
4	Autarkie/Eigenerzeugung	5 %
5	Soziale Akzeptanz	5 %
6	Innovationsgrad	5 %

Bei dieser Gewichtung resultiert folgendes Gesamtergebnis (vgl. Abbildung 22):

Bewertung Energiekonzepte im Variantenvergleich							
Variante	Investition	Laufende Kosten	Autarkie-grad	CO ₂ -Fuß-abdruck	Soziale Akzeptanz	Innovations grad	SUMME gewichtet
	50%	30%	5%	5%	5%	5%	100%
Variante 1: Kein Nahwärmenetz (Einzelversorgung über Gas-Kessel)	1	5	6	6	1	6	3
Variante 4: Nahwärmenetz mit Luftwärmepumpen , Gas-SLK und PV	3	4	4	3	2	3	3
Variante 3: Nahwärmenetz mit Holz , Gas-SLK und PV	4	3	5	2	3	3	3
Variante 5: Nahwärmenetz mit Erdsonden-Wärmepumpen , Holz u. PV	5	2	1	1	2	2	3
Variante 2: Nahwärmenetz mit Wasserstoff-BHKW und Gas-SLK	6	6	6	1	3	1	5

Abbildung 22: Ergebnis Szenario 1: „Kosten“

Bei einem Fokus auf die Kosten verbessert sich die Referenzvariante von „5“ auf „3“, da sie den Vorteil hat, keine Investitionskosten zu beinhalten. Außerdem wird deutlich, dass die Gewinnervariante 5 sich von „2“ auf „3“ verschlechtert. Somit liegen vier der fünf Varianten bei der Note „3“.

4.4.2 Szenario 2: „Klima“

Für das Szenario 2: „Klima“ wird folgende Gewichtung vorgenommen (vgl. Tabelle 4):

Tabelle 4: Kriteriengewichtung Szenario 2: „Klima“

Nr.	Kriterium	Gewichtung
1	Investitionskosten	5 %
2	Laufende Kosten	5 %
3	CO ₂ -Emissionen	50 %
4	Autarkie/Eigenerzeugung	30 %
5	Soziale Akzeptanz	5 %
6	Innovationsgrad	5 %

Die Ergebnisse für das zweite Szenario sind in Abbildung 23 abgebildet:

Bewertung Energiekonzepte im Variantenvergleich							
Variante	Investition	Laufende Kosten	Autarkie-grad	CO ₂ -Fuß-abdruck	Soziale Akzeptanz	Innovations grad	SUMME gewichtet
	5%	5%	30%	50%	5%	5%	100%
Variante 5: Nahwärmenetz mit Erdsonden-Wärmepumpen, Holz u. PV	5	2	1	1	2	2	2
Variante 3: Nahwärmenetz mit Holz, Gas-SLK und PV	4	3	5	2	3	3	3
Variante 2: Nahwärmenetz mit Wasserstoff-BHKW und Gas-SLK	6	6	6	1	4	1	3
Variante 4: Nahwärmenetz mit Luftwärmepumpen, Gas-SLK und PV	3	4	4	3	2	3	3
Variante 1: Kein Nahwärmenetz (Einzelversorgung über Gas-Kessel)	1	5	6	6	1	6	6

Abbildung 23: Ergebnis Szenario 2: „Klima“

Es zeigt sich, dass durch die hohe Gewichtung des CO₂-Fußabdrucks die Noten aller Nahwärme Varianten besser werden oder gleichbleiben. So verbessert sich die Variante 2 um zwei Notenpunkte. Die Variante 1 dagegen verschlechtert sich bei dieser Gewichtung von einer „5“ auf eine „6“.

4.5 Handlungsempfehlung Variantenvergleich

Insgesamt hat der Variantenvergleich der fünf Nahwärmekonzepte mit Variante 5 eine Siegervariante hervorgebracht, die in Summe mit „gut“ abschließt. Zusätzlich konnten zwei weitere Varianten mit der Note „3“ abschließen. Den letzten Platz teilen sich die Referenzvariante 1 und Variante 2 mit einer Gesamtnote von „5“ (vgl. Abbildung 24):

Bewertung Energiekonzepte im Variantenvergleich							
Variante	Investition	Laufende Kosten	Autarkiegrad	CO ₂ -Fußabdruck	Soziale Akzeptanz	Innovationsgrad	SUMME gewichtet
	20%	30%	20%	20%	5%	5%	100%
Variante 5: Nahwärmenetz mit Erdsonden-Wärmepumpen, Holz u. PV	5	2	1	1	2	2	2
Variante 3: Nahwärmenetz mit Holz, Gas-SLK und PV	4	3	5	2	3	3	3
Variante 4: Nahwärmenetz mit Luftwärmepumpen, Gas-SLK und PV	3	4	4	3	2	3	3
Variante 2: Nahwärmenetz mit Wasserstoff-BHKW und Gas-SLK	6	6	6	1	3	1	5
Variante 1: Kein Nahwärmenetz (Einzelversorgung über Gas-Kessel)	1	5	6	6	1	6	5

SLK= Spitzenlastkessel; PV= Photovoltaik

Abbildung 24: Gewichtetes Gesamtergebnis (siehe Abbildung 22)

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass ein Nahwärmenetz auf jeden Fall die bessere Lösung darstellt als eine dezentrale Einzelversorgung über Erdgas-Kessel. So schneidet Variante 1 im Ergebnis am schlechtesten ab. Bei der Frage, welche Art der Wärmeerzeugung am sinnvollsten ist, zeigt sich, dass der Einsatz von regenerativen Energieträgern langfristig die beste Option darstellt. Insbesondere die klimaneutrale Variante 5 schneidet daher mit „gut“ am besten ab. Hier wird die Wärme zum Großteil aus dem lokalen Grundwasser gewonnen und über Wärmepumpen genutzt. Die Spitzenlast wird über Holz abgedeckt. Somit wird die Wärme lokal und nachhaltig erzeugt. Auf fossile Energieträger wird verzichtet und somit sind die laufenden Kosten langfristig deutlich günstiger. Im Gegenzug sind jedoch höhere Investkosten erforderlich. Variante 3 und 4 sind ebenfalls denkbare Optionen, welche mit einer „befriedigend“ abschneiden. Hier werden ebenfalls klimafreundliche Energieträger eingesetzt, jedoch mit einem höheren Holzanteil (Variante 3) oder mit einer geringeren Effizienz (Variante 4). Dies wirkt sich auf die laufenden Kosten und den CO₂-Fußabdruck aus, weshalb die Varianten etwas schlechter abschneiden. Variante 2 kann unter den aktuellen Rahmenbedingungen nicht empfohlen werden. Wasserstoff ist im Moment kaum verfügbar und sehr teuer. Politisch wird eine Verwendung von Wasserstoff im Wärmesektor aktuell nicht angestrebt. Ob, wie viel und zu welchem Preis

grüner Wasserstoff zukünftig zur Verfügung steht, ist aktuell unklar. Zudem ergeben sich bei einer Wasserstoff-Lieferung per LKW erhebliche logistische Anforderungen, die sich auch auf die Akzeptanz der Bevölkerung vor Ort auswirken. Außerdem müsste bei dieser Variante in einer Übergangsphase weiterhin fossiles Erdgas eingesetzt werden, solange bis grüner Wasserstoff kostengünstig in ausreichenden Mengen verfügbar ist. Da das heute noch unklar ist, könnte dies zu einem sogenannten Lock-In-Effekt führen.

Insgesamt rät die AutenSys daher dringend von einem fossil betriebenen Nahwärmenetz ab. Schon heute werden fossile Energieträger immer teurer und der Trend wird sich langfristig fortsetzen. Um die Klimaziele einzuhalten, müssen fossile Energieträger (Öl, Kohle, Gas, etc.) durch regenerative Energieträger (Sonne, Wind, Biomasse, etc.) ersetzt werden. Daher empfiehlt die AutenSys, den Aufbau teurer Infrastrukturen auf Basis fossiler Energieträger zu vermeiden und stattdessen von vornherein auf zukunftsfähige regenerative Energien zu setzen. Daher kommen für die AutenSys lediglich die Varianten 3, 4 und 5 in Frage.

In Abstimmung mit der Stadt Waldenbuch wurde deshalb vereinbart, für die Varianten 4 und 5 eine Detailbetrachtung vorzunehmen. Diese wird in den folgenden Kapiteln erläutert.

5 Detailbetrachtung Siegervarianten

5.1 Energetische Ausgangsbasis

Im Rahmen der Bestandsaufnahme vom 19.05.2022 wurden alle 5 Gebäude hinsichtlich der aktuellen Energieversorgung untersucht. Die ermittelten technischen Ausgangsdaten wurden ausgehend vom Wärme- und Strombedarf der Gebäude aus dem Referenzjahr 2019 bestimmt.

Tabelle 5: Beschreibung der 5 Gebäude

	Rathaus 1	Rathaus 5	Musikschule	Museum (Schloss)	Stadtkirche
Baujahr	1575 (Anbau 1961)	1992	1560	1719 Umbau Museum 1978-1989	1607
Sanierung	Bedarf Fassade, Dach	-	Energiekonzept wurde erstellt	Fenster doppelt verglast, Dach teilsaniert	-
Aktuelle Heizung	Gas-Kessel (BJ 2012)	Gas-Kessel (BJ 2021)	Gas-Kessel (BJ 1990)	Gas-Kessel (BJ 2012)	Gas-Kessel (BJ 2002) und Elektrofußbodenheizung
Vorlauftemperaturen	~ 70-80 °C	~ 70-80 °C	~ 70-80 °C	Im Winter bis zu 85 °C	~ 70-80 °C
Art der WW-Erzeugung	Elektrische Boiler	Elektrische Boiler	Elektrische Boiler	Elektrische Boiler	Elektrische Boiler
Wärmeverteilung	Klassische Heizkörper	Klassische Heizkörper	Klassische Heizkörper	Klassische Heizkörper	Umluft (Zirkulation)
Photovoltaik	Auf Anbau möglich	Geringes Potenzial	Geringes Potenzial	Denkmalschutz	Gute Ausrichtung, aber Denkmalschutz
Wärmebedarf 2019	134.664 kWh	100.381 kWh	63.157 kWh	568.061 kWh	24.686 kWh
Strombedarf 2019	40.000 kWh	20.000 kWh	13.500 kWh	2.639 kWh	8.882 kWh
Heizlast gesamt	79,21 kW	59,05 kW	45,11 kW	334,15 kW	14,52 kW
Raumwärme %	95,4 %	95,4 %	96,6 %	95,4 %	95,4 %
Warmwasser %	4,6 %	4,6 %	3,4 %	4,6 %	4,6 %

Auf Basis der Wärmelastgänge der Gebäude kann die energetische Ausgangsbasis definiert werden. Auf diese Weise kann der Wärmebedarf, den das Nahwärmenetz decken soll, berechnet werden. Die wichtigsten Daten sind in Tabelle 7 dargestellt:

Tabelle 6: Energetische Ausgangsbasis

Inputdaten	Einheit	Wert
Anzahl Gebäude	[Stück]	5
Spez. Warmwasserbedarf	[%]	Ca. 4,6
Wärmebedarf gesamt	[kWh/a]	ca. 891.000
Strombedarf gesamt	[kWh/a]	ca. 85.000

5.2 Technische Annahmen Nahwärmenetz

Da für Variante 5 das Grundwasser von außerhalb des Stadtkerns bezogen werden müsste, während für Variante 4 das Nahwärmenetz lediglich im Stadtkern zwischen den Gebäuden und der Heizzentrale verlegt werden müsste, ergeben sich unterschiedliche technische Annahmen für die beiden Varianten.

Tabelle 7: Technische Annahmen Nahwärmenetz

Annahme	Einheit	Variante 5	Variante 4
Länge Transportnetz	[m]	1.000-1.300	0
Länge Verteilnetz	[m]	157	157
Wärmeverluste Leitungen	[%]	12,3	8,0
Wärmeverluste Übergabestationen	[%]	4,5	4,5
Temperaturniveau (Vorlauf)	[°C]	65	65
Heizlast (mit Wärmeverlusten)	[kW]	572	551
Wärmebedarf (mit Wärmeverlusten)	[kWh/a]	1.040.183	1.002.317
Gleichzeitigkeitsfaktor	[%]	92	92
Wärmebedarfsdichte	[MWh/m*a]	0,8	5,7
Nutzungsdauer	[Jahre]	40	40

Für Variante 5 wird also eine knapp 900 Meter lange Transportleitung verlegt, durch die der Wärmeverlust erhöht wird und dementsprechend Variante 5 einen höheren Wärmebedarf inklusive Wärmeverluste aufweist als Variante 4. Daher muss in Variante 5 insgesamt etwas mehr Wärme in der Heizzentrale erzeugt werden.

Auf Basis der Leitungslängen kann zusätzlich die Wärmebedarfsdichte ermittelt werden. Hierbei kann vereinfacht ausgedrückt werden: Je höher die Wärmebedarfsdichte, desto

geringer die Wärmeverluste und desto wirtschaftlich sinnvoller das Nahwärmenetz. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 25 dargestellt:

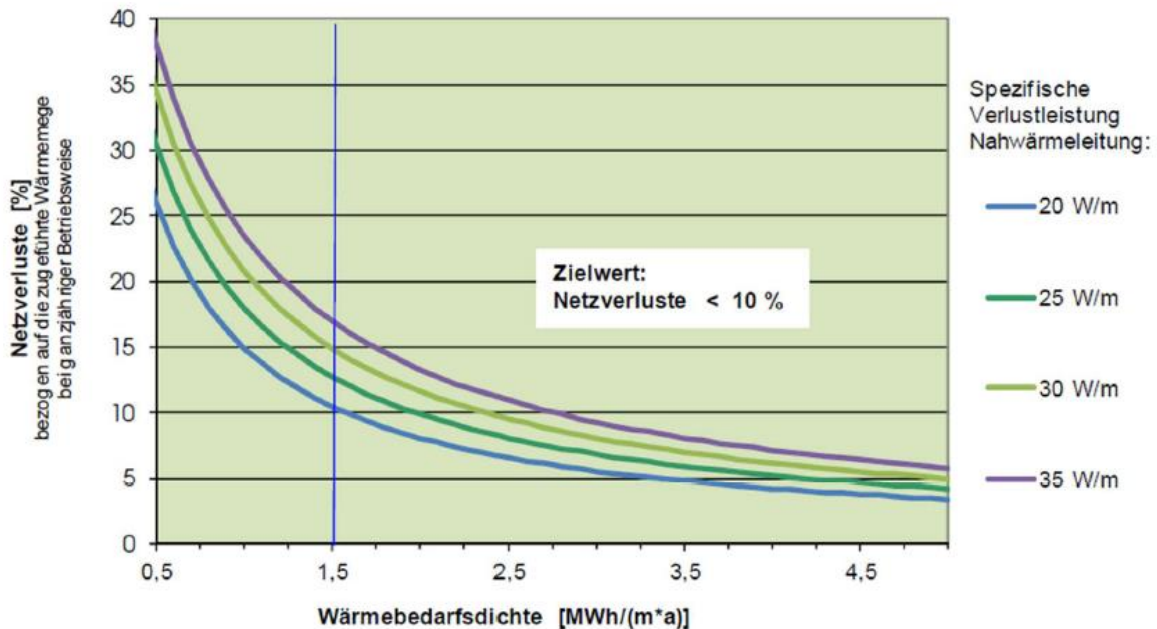


Abbildung 25: Abhängigkeit der Netzverluste an der Wärmebedarfsdichte

Die Wärmebedarfsdichte liegt bei Variante 5 mit ca. 0,8 MWh/(m*a) deutlich unter dem Zielwert von 1,5 MWh/(m*a). Die Wärmeverluste sind daher vergleichsweise hoch. Durch den Anschluss weiterer Wärmeabnehmer im Versorgungsgebiet würde sich die Wärmebedarfsdichte erhöhen und damit die spezifischen Verluste reduzieren. Bei Variante 4 liegt eine sehr hohe Wärmebedarfsdichte von ca. 5,7 MWh/(m*a) vor, da hier das Leitungsnetz deutlich kürzer ist. Dadurch sind auch die spezifischen Wärmeverluste entsprechend geringer.

5.3 Technische Randbedingungen der Siegervarianten

Im Folgenden werden die beiden Varianten detailliert beschrieben. Hierbei wird auch auf die technischen Annahmen und Rahmenparameter, wie z.B. die Dimensionierung der Wärmepumpen und zugehörigen Spitzenlastkessel eingegangen.

5.3.1 Variante 5: Grundwasser-Wasser-Wärmepumpe, Holz-Kessel, PV

Die erste Variante stellt die klimaneutrale Variante 5 dar. Hierbei wird die Grundlast durch eine Grundwasser-Wärmepumpe und die Spitzenlast durch den klimaneutralen Energieträger Holz abgedeckt. Hierbei wäre es erforderlich, die Heizzentrale sowie die Brunnenanla-

gen außerhalb des Stadtkerns zu errichten (zum Beispiel im Aichtal). Über eine Transportleitung gelangt das erwärmte Wasser in den Stadtkern und versorgt somit zentral alle fünf Gebäude mit Wärme. In Abbildung 26 ist die Funktionsweise der Variante und in Abbildung 27 das entsprechende Netz in Waldenbuch dargestellt.

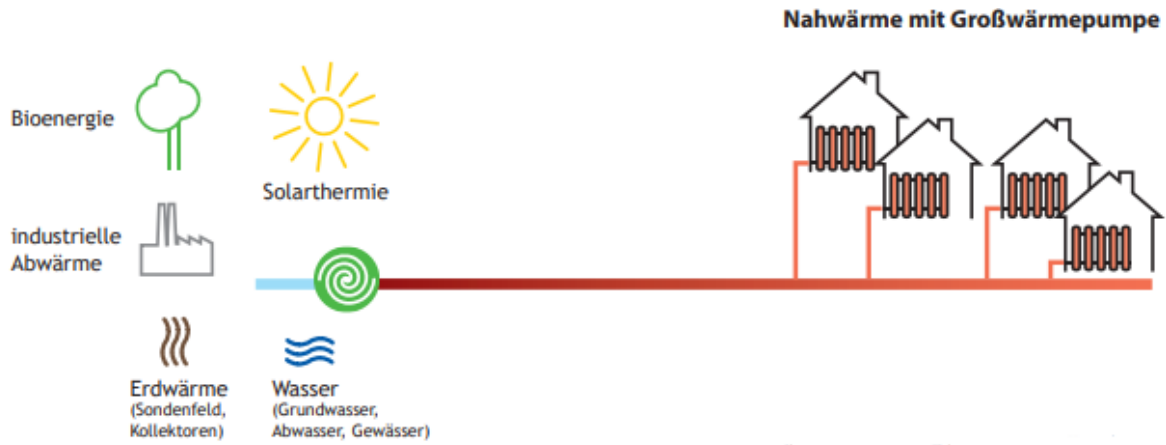


Abbildung 26: Niedertemperaturnetz mit zentraler Grundwasser-Wärmepumpe

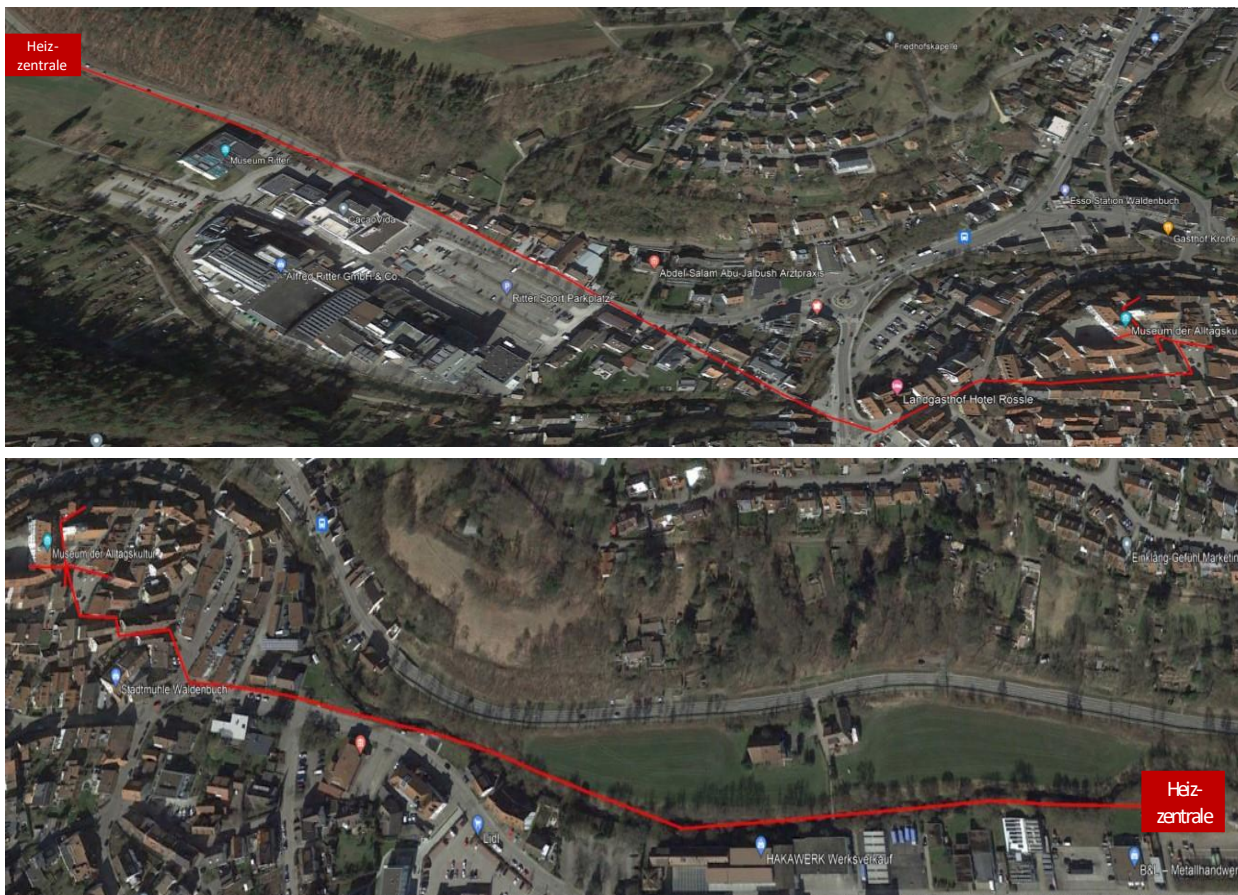


Abbildung 27: Mögliche Nahwärmenetze für Variante 5 mit beispielhaften Platzierungen der Heizzentrale

Da der Wirkungsgrad der Grundwasser-Wärmepumpe nicht von den Außentemperaturen abhängig ist, ist es empfehlenswert, einen bivalent-parallelen Betrieb der Anlagen zu wählen. Das bedeutet, dass die Wärmepumpe das gesamte Jahr hinweg bis zu einer gewissen Leistung heizt und an Tagen mit sehr hohem Wärmebedarf vom Holz-Kessel unterstützt, aber nicht ersetzt wird. Die Berechnungen ergeben, dass es am wirtschaftlichsten ist, wenn die Wärmepumpe Leistungen bis zu 84 % des Wärmebedarfs abdeckt. Dabei liegt die Heizlast inklusive Wärmeverlusten bei 572 kW, allerdings liegt diese zu 84 % der Zeit in einem Bereich, den eine Grundwasser-Wärmepumpe mit 200 kW thermischer Leistung decken kann. Für Spitzenlasten, bei denen die Wärmepumpe nicht ausreicht, wird ein Holzkessel mit ca. 300 kW thermischer Leistung installiert, der die übrigen 16 % des Bedarfs abdeckt. Aus Redundanzgründen ist es zusätzlich sinnvoll, einen Gas-Kessel mit ebenfalls 300 kW zu installieren, der allerdings nur im Notfall zum Einsatz kommt. Mit dieser Aufstellung kann der Wärmebedarf der fünf Gebäude zu jeder Zeit des Jahres vollständig abgedeckt werden. Alle wesentlichen technischen Daten von Variante 5 sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Wichtig ist noch zu erwähnen, dass das Nahwärmenetz praktisch nur während der Heizperiode in Betrieb ist. Im Sommer wird der Großteil der Wärme für die Warmwasserversorgung benötigt. Diese beträgt jedoch unter 5% des Gesamtwärmebedarfs (vgl. Tabelle 5). Bei Betrieb des Wärmenetzes wären die Wärmeverluste im Sommer somit höher als der eigentliche Wärmebedarf. Dies macht energetisch und wirtschaftlich keinen Sinn. Daher wird empfohlen die Warmwasserversorgung in den 5 Gebäuden weiterhin dezentral über Durchlauf-erhitzer bzw. elektrische Boiler bereitzustellen. Sollte sich das Nahwärmenetz zukünftig erweitern und der Wärmebedarf im Sommer ansteigen, kann das Wärmenetz auch im Sommer betrieben werden.

Tabelle 8: Technische Daten Variante 5

Technische Daten	Wert	Einheit
Grundwasser-Wasser-Wärmepumpe (Grundlast):		
th. Leistung	200	kW
el. Leistung	78	kW
th. Wirkungsgrad	258	%
Wärmeerzeugung	898.470	kWh/a
Anteil Wärmeerzeugung	84	%
Strombedarf	348.530	kWh/a
Volllaststunden	4.492	h/a
Holz-Brennwert-Kessel (Spitzenlast):		
th. Leistung	300	kW
th. Wirkungsgrad	90	%
Wärmeerzeugung	175.001	kWh/a
Anteil Wärmeerzeugung	16	%
Brennstoffbedarf	194.446	kWh/a
Volllaststunden	611	h/a
Gas-Brennwert-Kessel (Redundanz):		
Th. Leistung	300	kW
Th. Wirkungsgrad	90	%
Wärmeerzeugung	0	kWh/a
Anteil Wärmeerzeugung	0	%
Brennstoffbedarf	0	kWh/a
Volllaststunden	0	h/a

Ein entscheidender Punkt für die Umsetzung einer solchen Lösung sind die hydrogeologischen Bedingungen vor Ort. Nicht überall ist die erforderliche Wassermenge, die Grundwasserqualität und die Wassertemperatur zum Betrieb einer Brunnenanlage gewährleistet. Die Anforderungen an die Wasserqualität sind sehr hoch. Bei nicht ausreichender Wasserqualität, z.B. bei zu viel Eisen (Eisenkonzentrationen > 0,2 mg/l) oder Mangan im Grund-

wasser, können Ablagerungen (Verockerung, Verschlammung) vor allem im Wärmetauscher der Wärmepumpe und dem Förder- und Schluckbrunnen auftreten. Verstärkt wird der Verockerungseffekt der Grundwasser-Wärmepumpe durch den Sauerstoffgehalt (positives Redoxpotenzial) und pH-Wert (pH-Wert > 5).⁸ Daher wurden im Vorfeld die Analyseberichte von der Alfred Ritter GmbH & Co. KG für das Jahr 2019 eingeholt und hinsichtlich der kritischen Parameter geprüft. Diese betreiben seit vielen Jahren im Aichtal Brunnenanlagen. Die Auswertung der Analysebericht ergab, dass viele Parameter in einem guten Bereich liegen. So ist z.B. der Eisengehalt bei ca. 0,1 mg/l und der Mangan-Gehalt bei < 0,01 mg/l und damit deutlich unter den Grenzwerten. Der Sauerstoffgehalt und der pH-Wert liegen hingegen in einem eher ungünstigen Bereich. So liegt der Sauerstoffgehalt bei ca. 1,7 mg/l und damit knapp unter dem Grenzwert von 2,0. Der pH-Wert liegt bei 6,9 und damit etwas über dem Grenzwert von 6,5. Dadurch besteht eine erhöhte Korrosionsgefahr. Insgesamt ist daher noch keine finale Einschätzung zu treffen, inwieweit weit das Grundwasser für den Betrieb der Wärmepumpen geeignet ist. Dies ist im Verlauf des weiteren Planungs- und Genehmigungsprozesses zu prüfen. Der Genehmigungsprozess ist in Abbildung 28 dargestellt ist. Dieser geht aus dem Leitfaden für die Nutzung von Erdwärme mit Grundwasser-Wärmepumpen vom Umweltministerium Baden-Württemberg hervor, welcher einen sehr guten Überblick zu dem Thema liefert.

⁸ <https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/erdwaerme/erdwaermetauscher/grundwasser-waermepumpe>

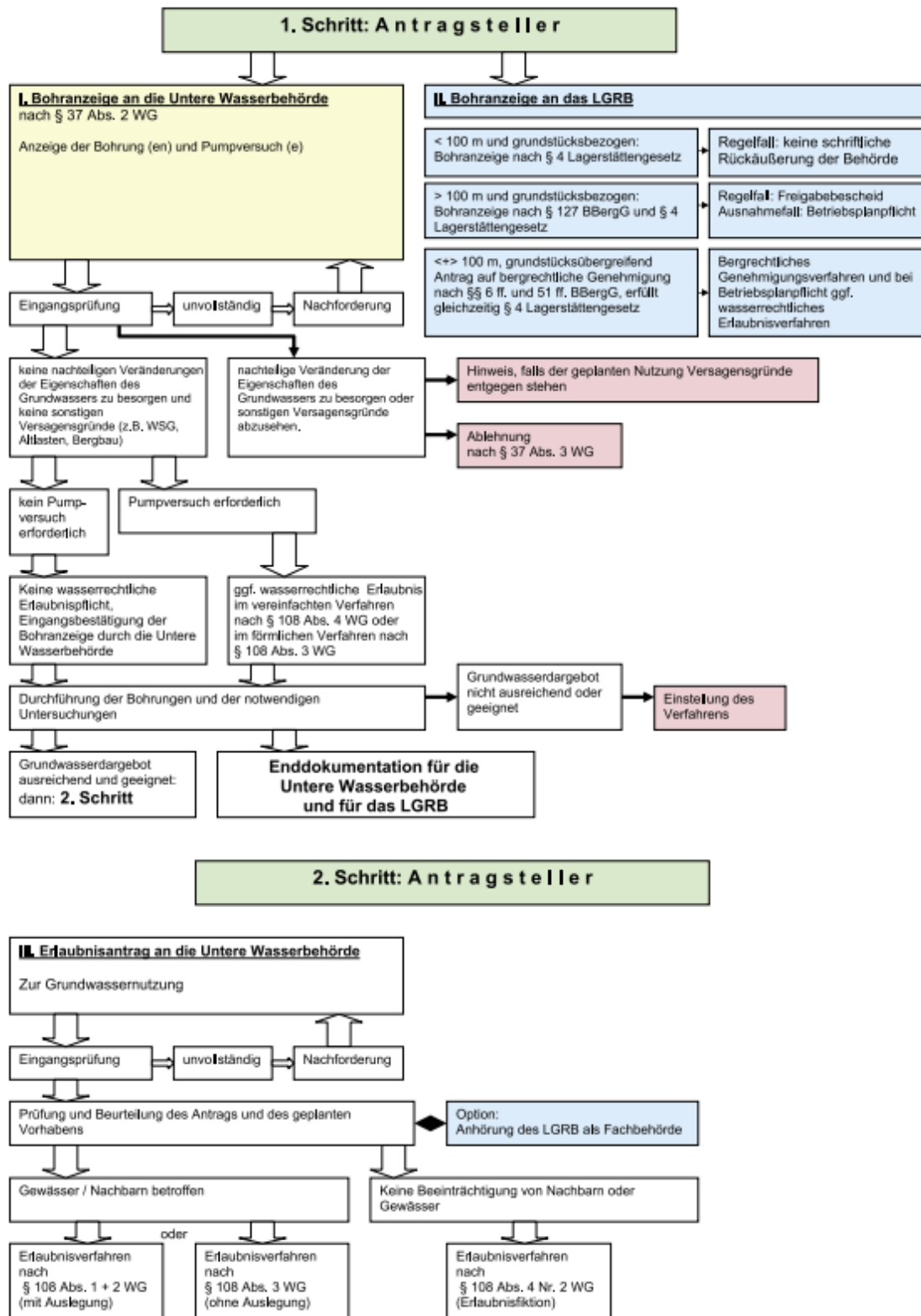


Abbildung 28: Genehmigungsprozess Nutzung Grundwasser-Wärmepumpe⁹

⁹ https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Energie/1_Leitfaden_Erdwaerme_Grundwasserwaermepumpen.pdf

5.3.2 Variante 4: Luft-Wasser-Wärmepumpe, Gas-Kessel, PV

Die zweite betrachtete Variante ist Variante 4, in welcher die Grundlast mit einer zentralen Luft-Wasser-Wärmepumpe und die Spitzenlast mit einem Gas-Kessel abgedeckt wird. Die Heizzentrale könnte in diesem Fall zentral, z.B. südlich der Gebäude unter dem Marktplatz errichtet werden. Von dort aus führt ein Hauptstrang zu jedem der fünf Gebäude. Der mögliche Trassenverlauf ist in Abbildung 29 dargestellt.

Anders als in Variante 5 ist die hier verwendete Luft-Wasser-Wärmepumpe von der Außentemperatur abhängig. Das führt zu einem dazu, dass die elektrische Leistung der Wärmepumpe höher angesetzt werden muss, da der Wirkungsgrad schlechter ist und zum anderen dazu, dass die Betriebsweise bivalent-alternativ angesetzt werden muss. Das bedeutet, dass die Wärmepumpe bei sehr tiefen Temperaturen nicht mehr arbeitet und der Gas-Kessel die gesamte Wärmeversorgung übernimmt. Dementsprechend groß muss der Gas-Kessel ausgelegt werden. Die Berechnungen ergeben hier ebenfalls, dass es am wirtschaftlichsten ist, wenn die Wärmepumpe Leistungen bis zu 84 % des Wärmebedarfs abdeckt. Dementsprechend benötigt die Luft-Wasser-Wärmepumpe eine thermische Leistung von 190 kW. Die um 10 kW niedrigere Auslegung in dieser Variante ist auf geringere Wärmeverluste durch die fehlende Transportleitung zu erklären. Der Gas-Kessel sollte die gesamte Heizlast inklusive Wärmeverlusten von 551 kW eigenständig tragen können und entsprechend groß ausgelegt sein. Alle wesentlichen Daten sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

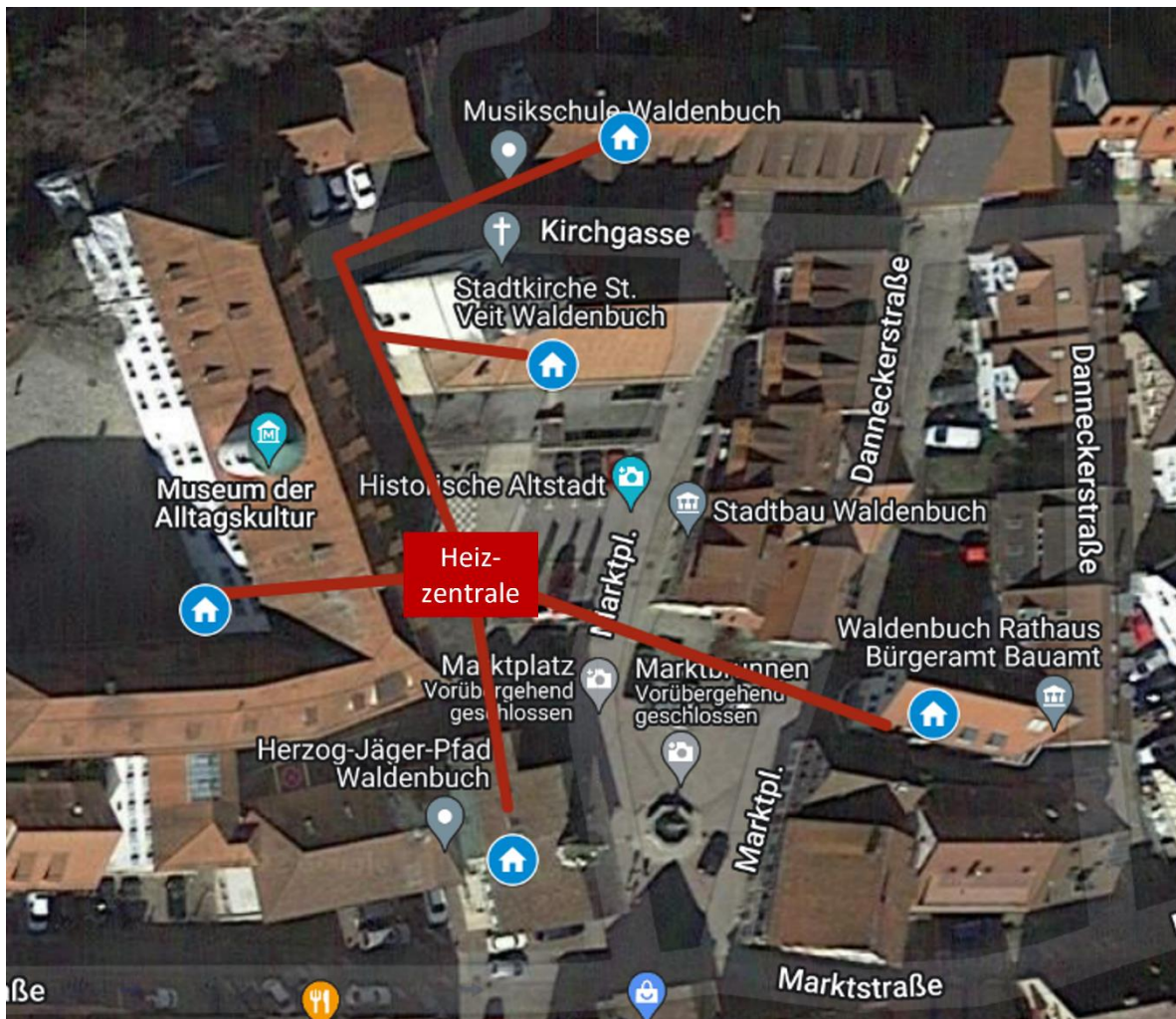


Abbildung 29: Möglicher Trassenverlauf Nahwärmenetz für Variante 4

Tabelle 9: Technische Daten Variante 4

Technische Daten	Wert	Einheit
Luft-Wasser-Wärmepumpe (Grundlast):		
th. Leistung	190	kW
el. Leistung	110	kW
th. Wirkungsgrad	172	%
Wärmeerzeugung	854.095	kWh/a
Anteil Wärmeerzeugung	83,6	%
Strombedarf	496.223	kWh/a
Volllaststunden	4.495	h/a
Gas-Brennwert-Kessel (Spitzenlast):		
th. Leistung	551	kW
th. Wirkungsgrad	90	%
Wärmeerzeugung	167.236	kWh/a
Anteil Wärmeerzeugung	16,4	%
Brennstoffbedarf	185.818	kWh/a
Volllaststunden	303	h/a

Vorteil dieser Variante ist, dass hier kein aufwändiger Planungs- und Genehmigungsprozess für das Brunnenwasser erforderlich ist. Für die Luft-Wärmepumpe ist lediglich ein geeigneter Aufstellort im Stadtkern zu finden.

6 Annahmen zur Wirtschaftlichkeitsberechnung

6.1 Investitionskosten

6.1.1 Annahmen Nahwärmenetz

Die Kosten für das Nahwärmenetz sind abhängig von der Größe und Dimensionierung des Netzes. Die Investitionskosten des Nahwärmenetz setzen sich aus drei Haupt-Bestandteilen zusammen:

- **Erdverlegte Wärmeleitungen:** Baustelleneinrichtung, Erdarbeiten, Durchpressung, Schutzrohre, Straßenbauarbeiten, Außenanlagen, Erdverlegte Rohrleitungen, Leckageüberwachung
- **Nahwärmeverteilung:** Heizwasserkreislaufkomponenten (Umwälzpumpengruppe, Druckhaltung, Armaturen und Rohrleitungssystem, Wasseraufbereitungsanlage), Dezentrale Übergabestationen/ Pufferspeicher, zentraler Pufferspeicher, Wärmedämmarbeiten, Entwässerungsarbeiten, Bewässerungsarbeiten, Elektroinstallation
- **Regelungstechnik:** Feldgeräte, DDC-Hardware und Dienstleistungen, Schaltschränke, Elektroverdrahtung

Die Kostenzusammenstellung ist in Tabelle 10 dargestellt. Unter dem Punkt „Spezifische Kosten Netz“ sind die oben aufgeführten Punkte enthalten.

Tabelle 10: Annahmen Kostenzusammenstellung Nahwärmenetz

Annahme	Einheit	Variante 5	Variante 4
Kosten Heizzentrale	[€]	231.135	231.135
Spezifische Kosten Leitungen	[€/m]	1.000	1.000
Kosten Wärmeleitungen	[€]	1.049.000	157.000
Kosten Übergabestationen	[€]	43.658	43.658
Gesamtkosten Nahwärmenetz	[€]	1.323.793	431.793

6.1.2 Annahmen Erschließung Wärmequelle

Neben den Kosten für das Wärmenetz sind für die Variante 5 ebenfalls die Erschließungskosten für die Nutzung von oberflächennaher Geothermie für die Brunnenanlagen relevant.

Diese sind stark abhängig von den tatsächlichen geologischen Gegebenheiten vor Ort, welche anhand von Probebohrungen bestimmt werden müssen.

Zur Bestimmung der Investitionskosten wird auf Erfahrungswerte von vergleichbaren Projekten zurückgegriffen. Die spezifischen Kosten werden mit 1.500 €/kW thermisch angenommen. Hierbei ist jedoch zu erwähnen, dass eine große Unsicherheit bezüglich dieser Annahme vorliegt. Insgesamt ergeben sich für Variante 5 Erschließungskosten von ca. 300.000 €. Von diesen Kosten sind durch die Bundesförderung effiziente Gebäude (BEG)-30 % förderfähig. Dadurch reduzieren sich die Kosten auf 210.000 €. Für Variante 4 fällt dieser Kostenpunkt nicht an.

6.1.3 Annahmen Heizungsanlage

In beiden Varianten werden Wärmepumpen zur Wärmeherzeugung in der Grundlast eingesetzt. Die Spitzenlast wird in Variante 5 durch einen Holzkessel abgedeckt. Außerdem kommt aus Gründen der Redundanz zusätzlich ein Gaskessel derselben Größe hinzu. In Variante 4 wird die Spitzenlast vollständig durch einen großen Gaskessel abgedeckt. Hierbei werden folgende Kosten angenommen:

Tabelle 11: Annahmen Investitionskosten Wärmeherzeuger

Annahme	Einheit	Variante 5	Variante 5 mit Förderung	Variante 4	Variante 4 mit Förderung
Luft-Wärmepumpe, zentral	[€]	-	-	195.616	146.712
Grundwasser-Wärmepumpe, zentral	[€]	244.415	171.091	-	-
Holz-Brennwertkessel, zentral	[€]	139.103	118.238	-	-
Gas-Brennwertkessel, zentral	[€]	24.844	24.844	48.173	48.173
Gesamtkosten	[€]	408.362	314.173	243.789	194.885

Die Investitionskosten für Variante 5 sind hierbei höher, da Grundwasser-Wärmepumpen etwas teurer als die Luft-Wärmepumpen sind. Außerdem wird ein Holz-Brennwertkessel benötigt, der ebenfalls in der Anschaffung im Verhältnis zu einem Gaskessel sehr teuer ist.

Insgesamt ergeben sich folgende Gesamtkosten für alle Investitionen mit und ohne Förderungen:

Tabelle 12: Annahmen Investitionskosten

Investitionskosten	Einheit	Variante 5	Variante 5 mit Förderung	Variante 4	Variante 4 mit Förderung
Nahwärmenetz & Infrastruktur	[€]	1.323.793	992.845	431.793	323.845
Erschließungskosten Quellwärme	[€]	300.000	210.000	-	-
Heizungsanlagen	[€]	408.362	314.173	243.789	194.885
Gesamtkosten	[€]	2.032.155	1.517.018	675.582	518.730

Hinzu kommen weitere Kosten für Planung, Genehmigung, welche zu diesem Zeitpunkt noch nicht abgeschätzt werden können.

6.2 Verbrauchsgebundene Kosten

Die verbrauchsgebundenen Kosten sind vor allem vom Strompreis sowie der Effizienz der Wärmepumpe abhängig. Aufgrund der aktuellen Energiekrise ist es sehr schwer, langfristige Strompreise zu prognostizieren. Eine Strompreisentwicklung in den nächsten Jahren wird in der Kalkulation dennoch moderat angenommen, da davon ausgegangen wird, dass trotz der aktuellen Krise politisch langfristig eine „bezahlbare“ Elektrifizierung des Energiesektors angestrebt wird. So wurde zum Beispiel die EEG-Umlage dieses Jahr abgeschafft. Dabei wird in der Rechnung deutlich, dass Variante 5 aufgrund der höheren Effizienz der Grundwasser-Wärmepumpe einen geringeren Strombedarf und demnach geringere jährliche Stromkosten aufweist.

Weitere verbrauchsgebundene Kosten sind die Brennstoffkosten für die Spitzenlastdeckung der jeweiligen Varianten. In der Variante 5 fallen hierbei Kosten für den Bezug von Holz in Form von Hackschnitzel an. Der Redundanzgaskessel wird allerdings ohne Verbrauch berechnet, da dieser nur im Notfall betrieben wird. In der Variante 4 fallen Kosten für den Bezug von Erdgas an.

Insgesamt zeigen die verbrauchsgebundenen Kosten sowohl in der Grundlast als auch in der Spitzenlast in der Variante 4 höhere Werte als in der Variante 5 auf.

Die Annahmen zu den verbrauchsgebundenen Kosten sind in Tabelle 13 dargestellt:

Tabelle 13: Annahmen verbrauchsgebundene Kosten

Annahme	Einheit	Variante 5	Variante 4
Effizienz Wärmeerzeugung ¹⁰	[kWhth./kWhel.]	2,58	1,72
Jährlicher Stromverbrauch	[kWh/a]	348.780	496.440
Strompreis Netz Jahr 0	[ct/kWh]	25,0	25,0
Steigerungsrate Strom	[%/a]	2,0	2,0
Ø jährliche Stromkosten ¹¹	[€/a]	87.133	124.056
Ø jährliche Holzkosten	[€/a]	14.840	-
Ø jährliche Gaskosten	[€/a]	-	27.927
Ø jährliche Brennstoffkosten	[€/a]	101.973	151.983

6.3 Betriebsgebundene Kosten

Bei den betriebsgebundenen Kosten werden die Kosten für Wartung und Instandhaltung betrachtet. Auch hier werden dynamische Entwicklungen, wie Inflation, berücksichtigt. Dabei wird von folgenden Annahmen ausgegangen (vgl. Tabelle 14):

Tabelle 14: Annahmen betriebsgebundene Kosten

Annahme	Einheit	Variante 5	Variante 4
Betriebskosten Wärmepumpe Jahr 0	[€/a]	800	1.467
Betriebskosten Holz-Kessel Jahr 0	[€/a]	4.308	-
Betriebskosten Gas-Kessel Jahr 0	[€/a]	229	940
Betriebskosten Wärmenetz Jahr 0	[€/a]	1.664	1.604
Inflation	[%/a]	1,6	1,6
Ø Betriebskosten gesamt ¹²	[€/a]	8.767	4.333

Insgesamt sind die Betriebskosten für beide Varianten sehr gering, da es sich jeweils um zentrale Lösungen handelt, bei der nur einzelne große Anlagen instandgehalten werden müssen anstatt viele kleinere Anlagen. Dennoch sind die betriebsgebundenen Kosten bei Variante 5 deutlich höher als bei Variante 4, was zum einen auf die größere Anzahl an

¹⁰ Anhand der Jahresarbeitszahl für die Wärmebereitstellung für Heizung und Trinkwarmwasser

¹¹ Über 20 Jahre betrachtet

¹² Heizung über 20 Jahre und Netz über 40 Jahre betrachtet

Anlagen zurückzuführen ist und zum anderen auf die hohen Wartungskosten für Holz-Kessel.

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung werden weitere Annahmen getroffen:

- Kalkulatorischer Zinssatz: 3 %
- Betrachtungszeitraum: 20 Jahre
- Anschlussquote an das Nahwärmenetz: 100 %

6.4 Zusammenfassung

In Tabelle 15 sind alle Kosten (inklusive Förderung) noch einmal als Jahresvollkosten zusammengefasst dargestellt:

Tabelle 15: Überblick Jahresvollkosten

Vollkosten	Einheit	Variante 5	Variante 4
Kapitalkosten mit Förderung	[€/a]	75.180	27.446
Verbrauchsgebundene Kosten	[€/a]	128.358	191.308
Betriebsgebundene Kosten	[€/a]	8.767	4.818
Jahresvollkosten	[€/a]	212.305	223.572

7 Ergebnis

Auf Basis der getroffenen Annahmen und Rahmenbedingungen werden im Folgenden die Ergebnisse für jede Variante dargestellt:

7.1 Wirtschaftlichkeitsberechnung

Um die Varianten hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit miteinander vergleichen zu können, werden die Wärmegestehungskosten betrachtet. In den Wärmegestehungskosten sind alle Kosten zusammengefasst. Sie geben an, welche Gesamtkosten pro gelieferter kWh Wärme entstehen. In Abbildung 30 sind die Wärmegestehungskosten für die beiden Varianten für den Fall ohne Förderung nach BEG dargestellt:

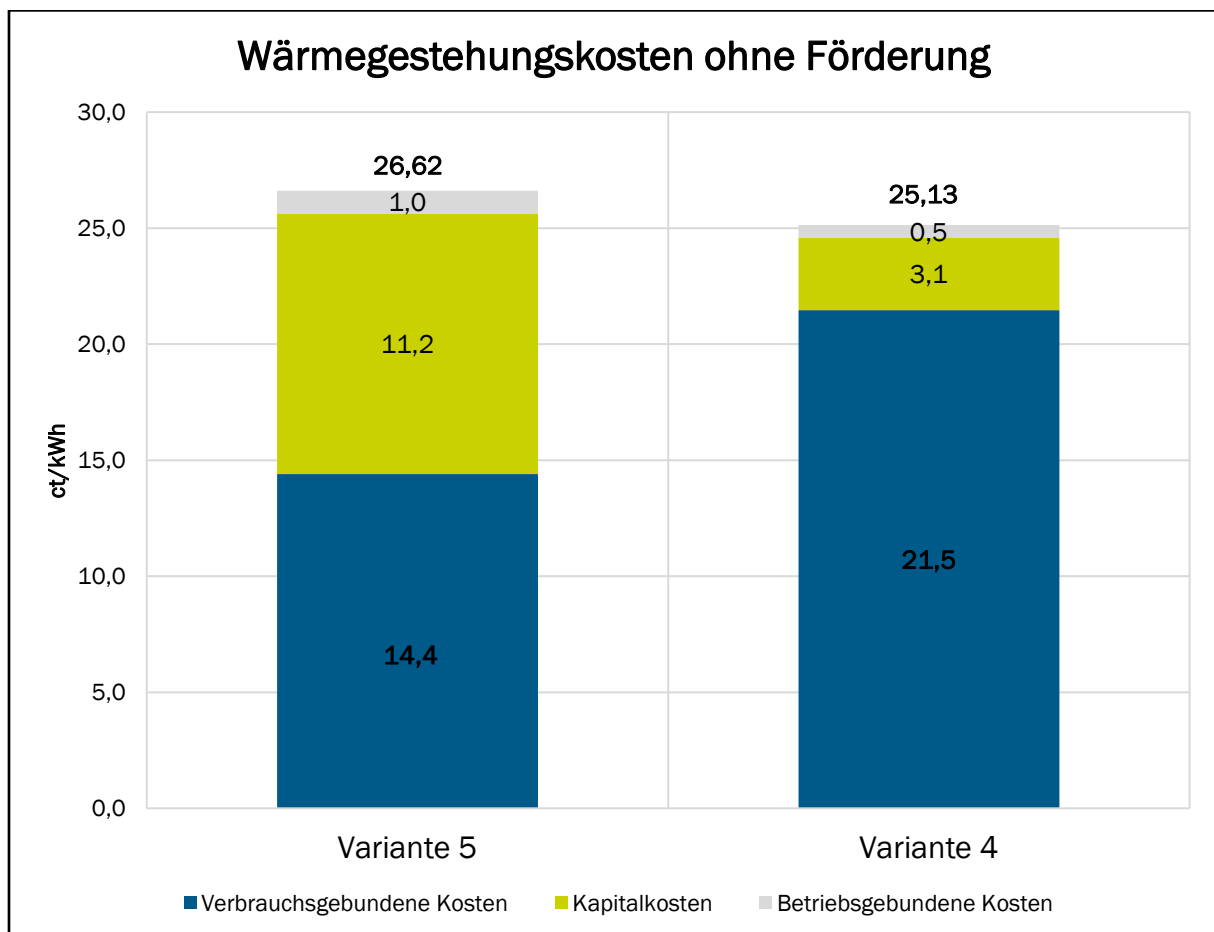


Abbildung 30: Wärmegestehungskosten ohne Förderung

Es zeigt sich, dass beide Varianten etwa gleich abschneiden, wobei in Variante 5 die Investitionskosten den größten Teil einnehmen und die laufenden Kosten deutlich geringer sind als bei Variante 4. Insgesamt liegen ohne Förderung die Wärmegestehungskosten mit

26,62 ct/kWh bei Variante 5 leicht über Variante 4 mit 25,13 ct/kWh. Unter Einbeziehung der Förderung sieht das Ergebnis etwas anders aus (vgl. Abbildung 31):

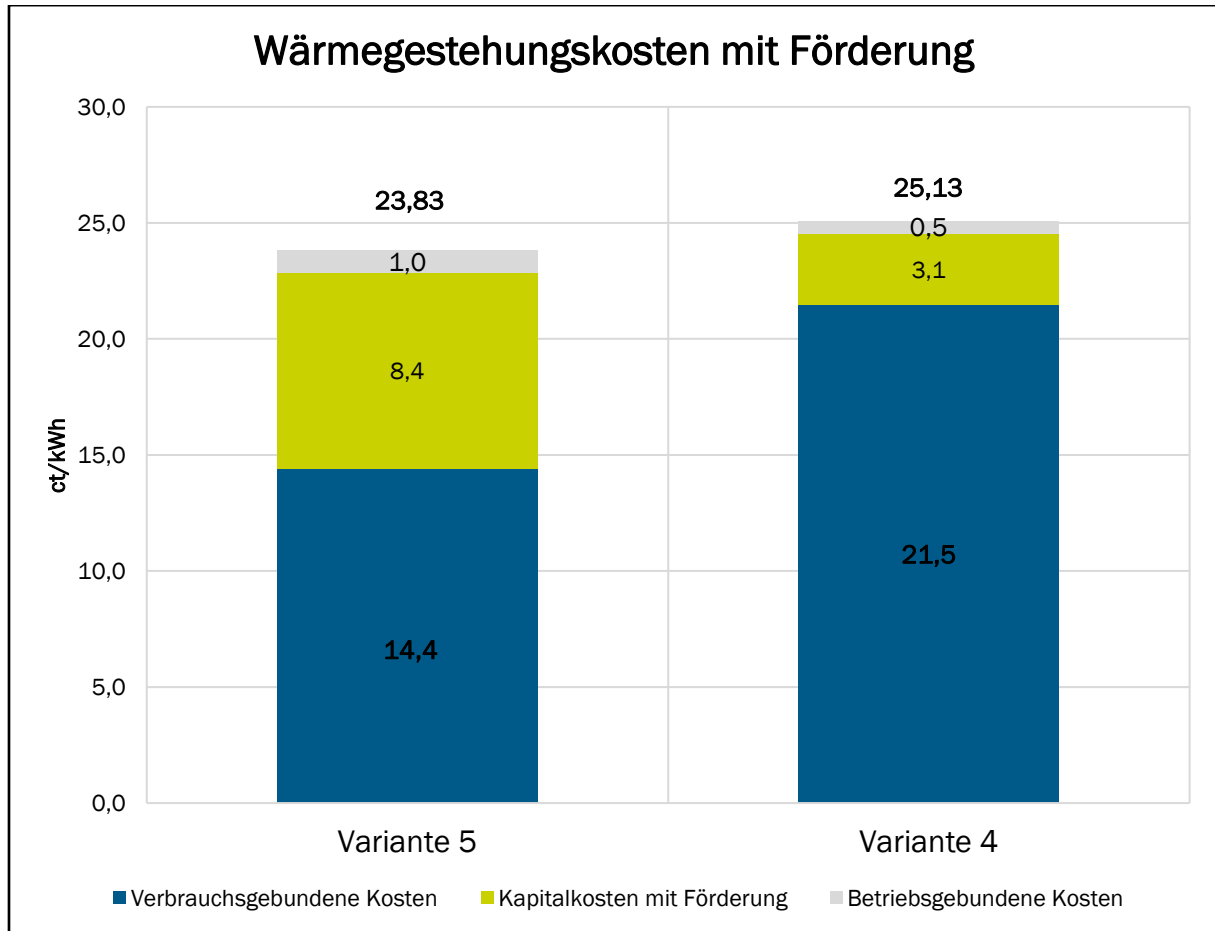


Abbildung 31: Wärmegestehungskosten mit Förderung

Inklusive Förderung liegen die Wärmegestehungskosten von Variante 5 leicht unter denen von Variante 4.

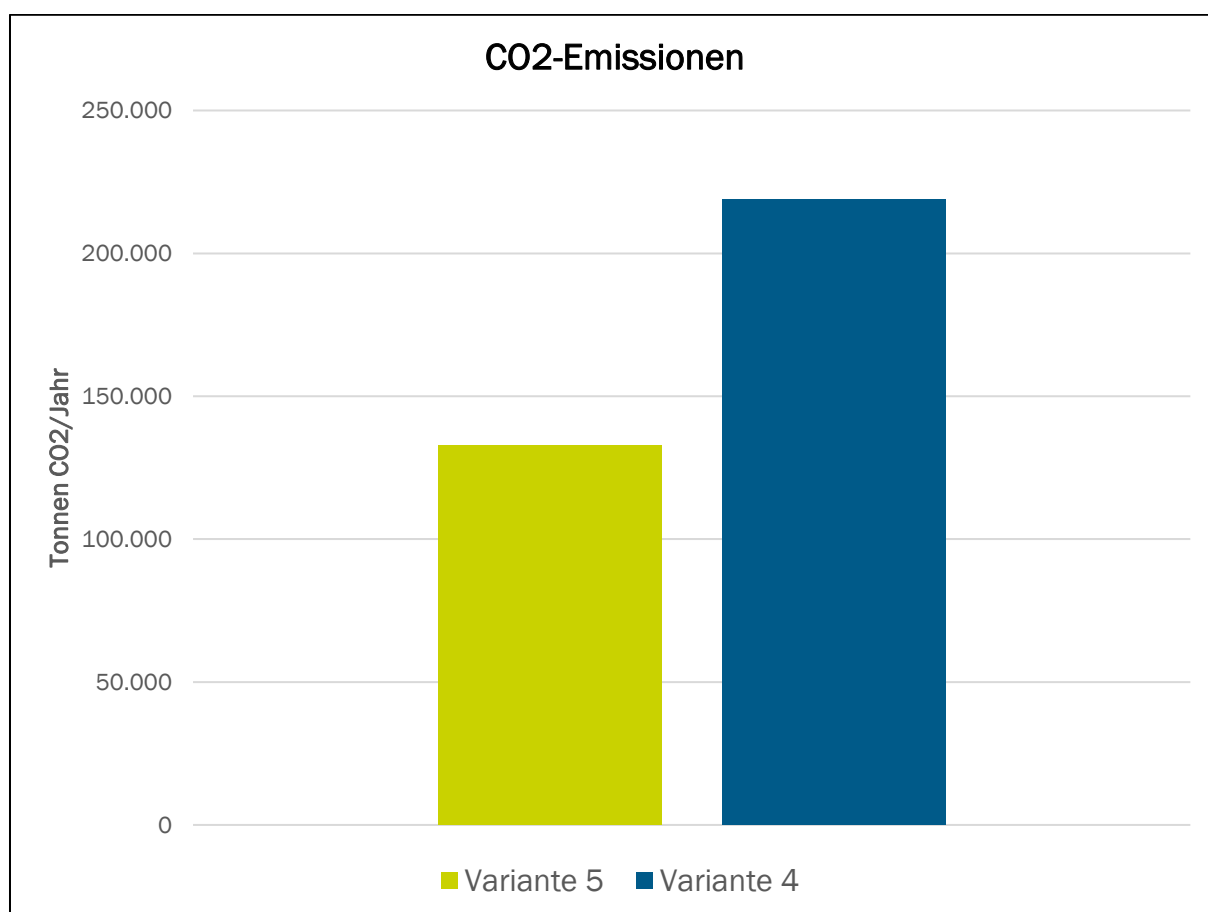
7.2 CO₂-Emissionen

Als zweites Kriterium werden die CO₂-Emissionen der jeweiligen Varianten miteinander verglichen. Hierbei werden die Emissionen, welche durch den Strombezug der Wärmepumpen aus dem öffentlichen Netz entstehen, herangezogen. Außerdem werden die Emissionen durch die Verbrennung von Erdgas berücksichtigt. Die Verbrennung von Holz kann bilanziell als fast emissionsfrei betrachtet werden. Hierbei werden folgende Emissionsfaktoren angenommen (vgl. Tabelle 16):

Tabelle 16: Emissionsfaktoren Berechnung CO₂-Emissionen

Energieträger	Emissionsfaktoren in [g CO ₂ /kWh]] ¹³
Strom aus öffentlichem Netz	366
Verbrennung von Erdgas	201
Verbrennung von Biomasse Holz	27

Die CO₂-Emissionen lassen sich durch Multiplikation des Energieverbrauchs mit dem jeweiligen Emissionsfaktor berechnen. Hieraus resultiert folgendes Ergebnis (vgl. Abbildung 32):

Abbildung 32: CO₂-Ausstoß der jeweiligen Varianten

Somit schneidet Variante 5 auch in Bezug zu den CO₂-Emissionen deutlich besser als Variante 4 ab.

¹³ Quelle: https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_infoblatt_co2_faktoren_2021.html

8 Sensitivitätsanalyse

Der Variantenvergleich hat in Bezug auf die Wirtschaftlichkeitsanalyse kein klares Ergebnis geliefert. Demnach schneidet Variante 5 bezüglich der Wärmegestehungskosten ohne Förderung mit 26,62 ct/kWh leicht schlechter ab als Variante 4 mit 25,13 ct/kWh. Werden die Wärmegestehungskosten mit BEG-Förderung betrachtet, so schneidet Variante 5 mit 23,83 ct/kWh etwa 2 ct/kWh besser ab als Variante 4 mit 25,09 ct/kWh ab. Auch wenn diese Ergebnisse sehr nah beieinander liegen, haben beide Variante sehr unterschiedliche Kostenschwerpunkte. Während bei Variante 5 eher hohe Investitions- und Erschließungskosten und geringere laufende Kosten entstehen, sind es bei Variante 4 geringere Investitions- und keine Erschließungskosten und dafür höhere laufende Kosten. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wird geprüft, wie sich das Ergebnis verändert, wenn einzelne Parameter der Ausgangsberechnung variiert werden. Dabei werden Parameter ausgewählt, deren Einfluss auf die Wärmegestehungskosten besonders hoch und/oder deren Datenqualität besonders unsicher ist. Die Wärmegestehungskosten sind dabei immer inklusive BEG-Förderung angegeben.

8.1 Anzahl der Anschlussnehmer

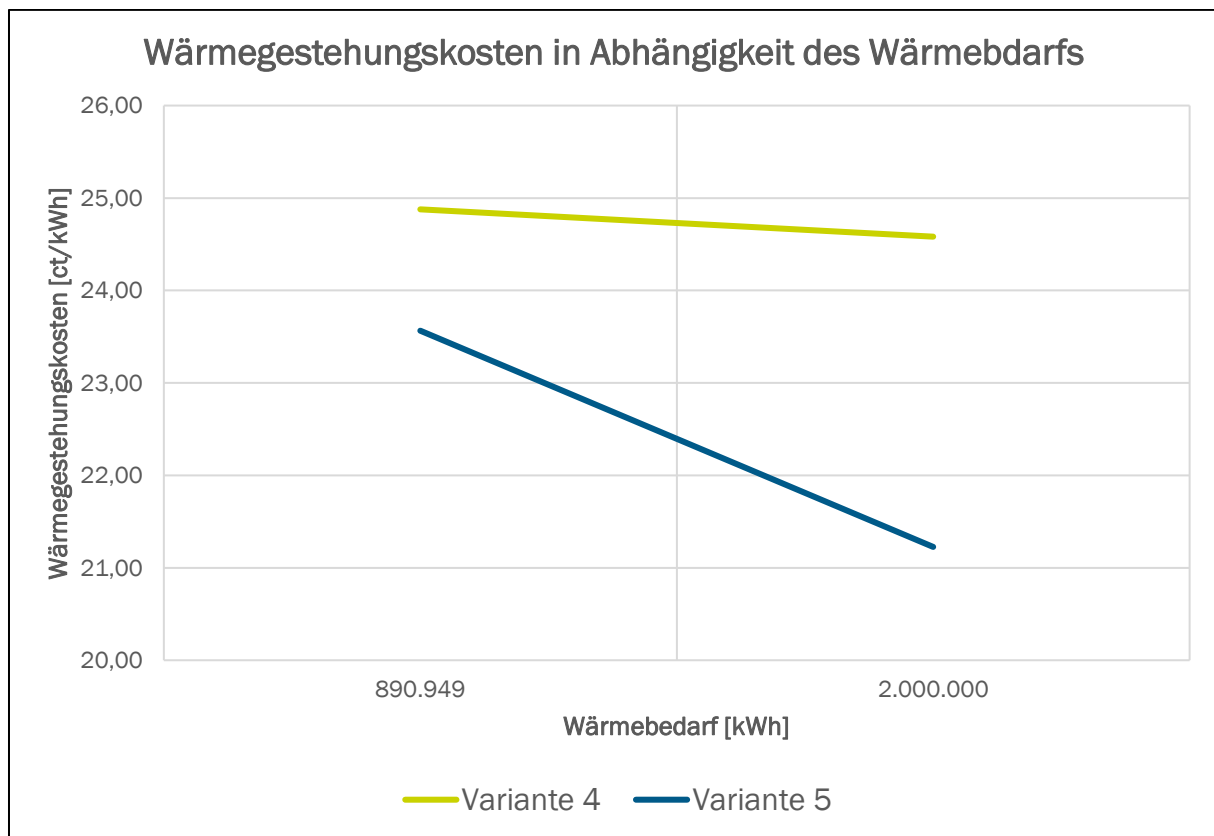


Abbildung 33: Wärmegestehungskosten in Abhängigkeit des Wärmebedarfs

Aktuell wird das Nahwärmenetz für fünf öffentliche Gebäude geplant. Langfristig steht zur Debatte, diese durch weitere Gebäude zu ergänzen. Hierdurch würde sich der Wärmebedarf entsprechend erhöhen. Eine Erhöhung der Anzahl der Abnehmer führt zu einer Verringerung der spezifischen Fixkosten für das Wärmenetz. In Abbildung 33 ist dargestellt, dass die Wärmegestehungskosten von Variante 5 durch die geringeren verbrauchsgebundenen Kosten der Grundwasser-Wasser-Wärmepumpe stärker von einer höheren Anzahl der Anschlussnehmer profitieren als die Kosten von Variante 4. Sollte sich der Wärmebedarf z.B. auf 2.000.000 kWh erhöhen, betragen die Wärmegestehungskosten von Variante 5 inklusive Förderungen nur noch 21,23 ct/kWh, während die Kosten von Variante 4 sich nur auf 24,58 ct/kWh reduzieren.

8.2 Stromkosten

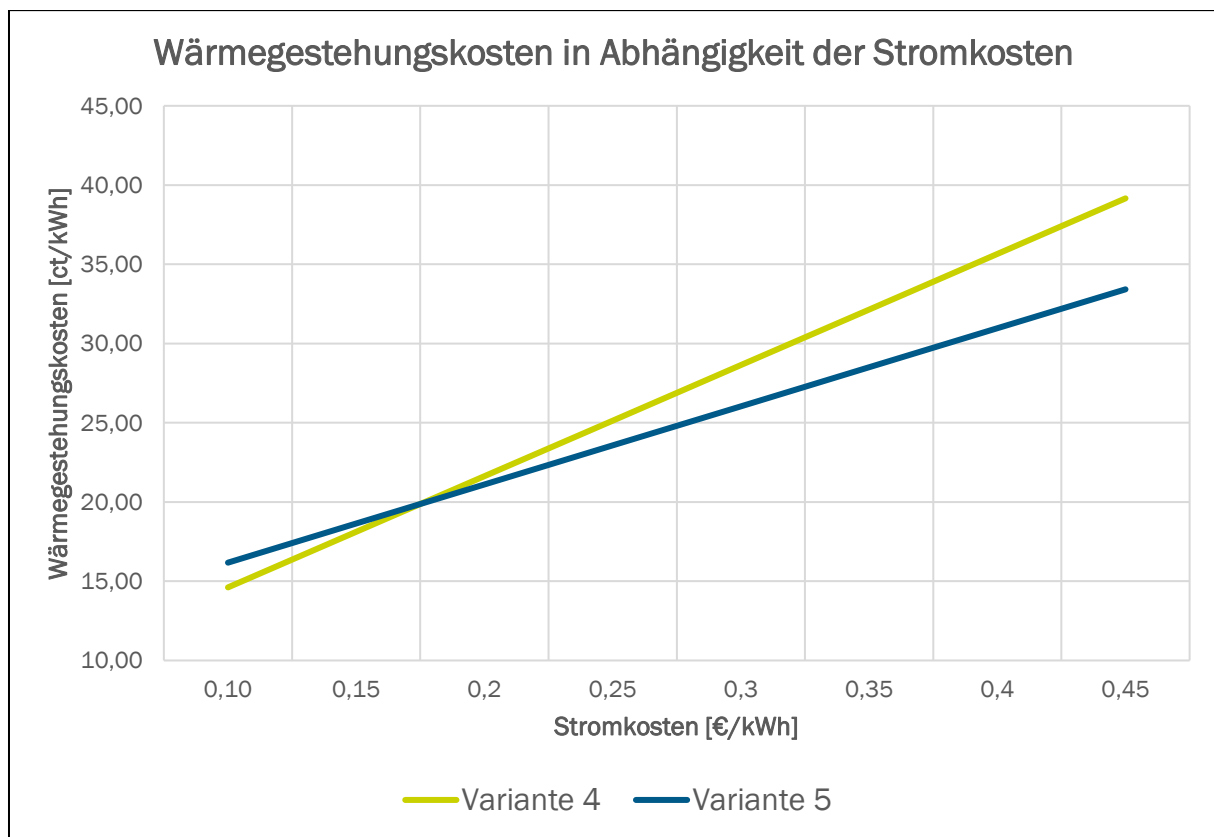


Abbildung 34: Wärmegestehungskosten in Abhängigkeit der Stromkosten

Ein weiterer Unsicherheitsfaktor, der Einfluss auf das Gesamtergebnis hat, ist der Strompreis. In Abbildung 34 wird dargestellt, ab welchem Strompreis Variante 5 geringere Wärmegestehungskosten aufweist als Variante 4. Dabei wird deutlich, dass ab einem Strompreis von etwas unter 20 ct/kWh Variante 5 günstigere Wärmegestehungskosten aufweist als Variante 4. Variante 4 reagiert also sensibler auf steigende Strompreise. Dies ist auf

die geringere Effizienz der Luft-Wärmepumpe zurückzuführen, welche in Variante 4 mehr Strom verbraucht.

8.3 Kosten Nahwärmenetz

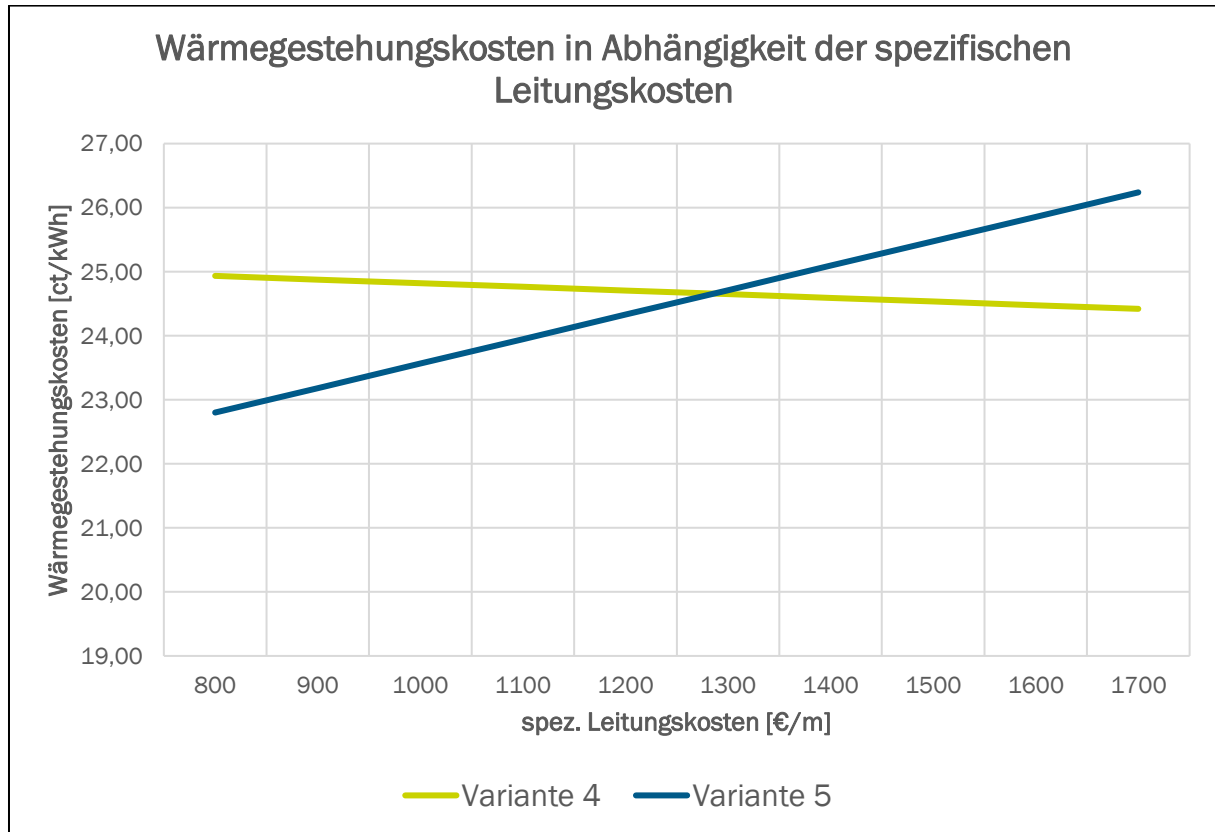


Abbildung 35: Wärmegestehungskosten in Abhängigkeit der spez. Leitungskosten

In der Wirtschaftlichkeitsrechnung betragen die spezifischen Kosten für die Leitung 1.000 € pro Meter. In Abbildung 35 sind die Wärmegestehungskosten für verschiedene Leitungskosten dargestellt. Ab einem Preis von etwa 1.300 € pro Meter befinden sich die Wärmegestehungskosten von Variante 5 über den Kosten von Variante 4. Die sensiblere Reaktion von Variante 5 ist auf die deutlich längere Leitung zurückzuführen.

8.4 Vorlauftemperaturen

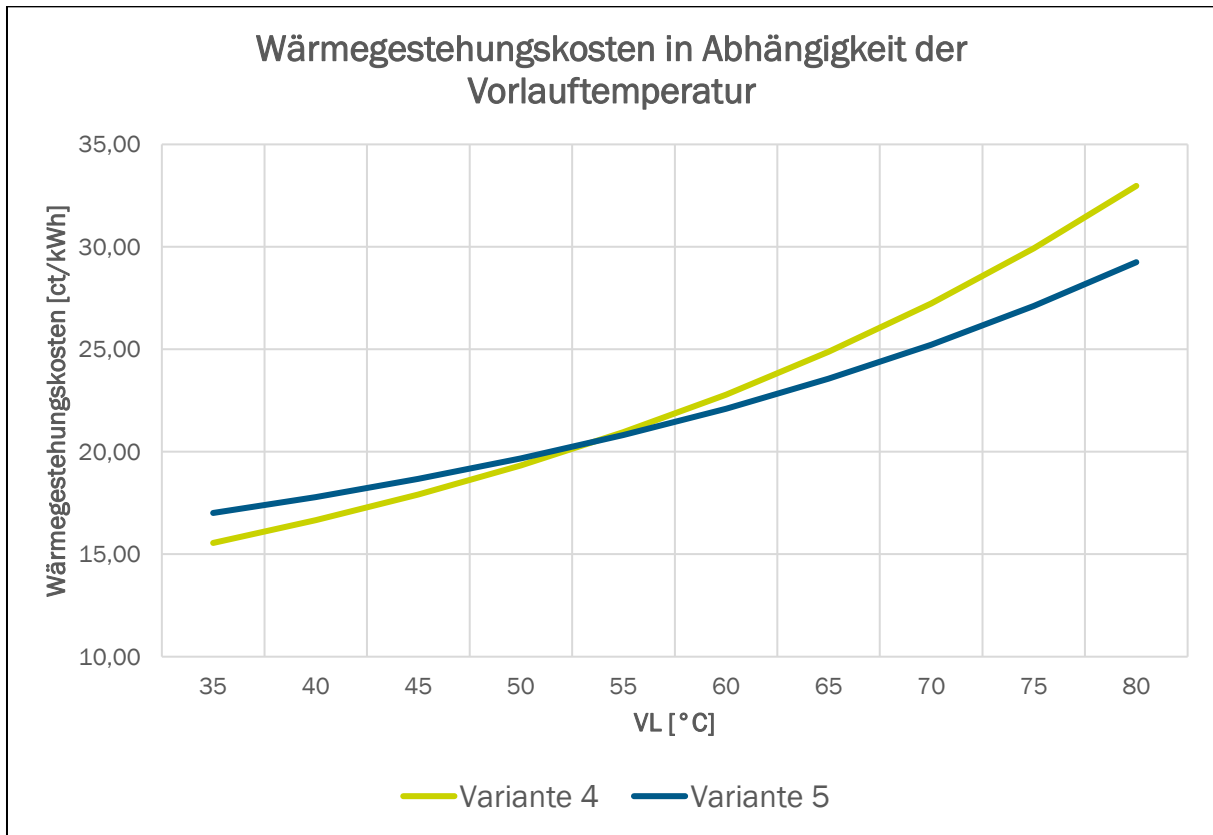


Abbildung 36: Wärmegestehungskosten in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur

Die Vorlauftemperatur im Wärmenetz hat einen entscheidenden Einfluss auf die Effizienz der Wärmepumpen und damit auf die Kosten des Gesamtsystems. Es gilt: Je geringer die Vorlauftemperatur, desto effizienter laufen die Wärmepumpen. Dementsprechend steigen die Wärmegestehungskosten bei steigender Vorlauftemperatur an. Bei Variante 4 ist der Anstieg aufgrund der geringeren Effizienz der Luft-Wasser-Wärmepumpe im Vergleich zur Wasser-Wasser-Wärmepumpe deutlicher. Es sollte daher in beiden Varianten angestrebt werden, die Vorlauftemperatur durch Maßnahmen an der Gebäudehülle (Dämmung der Fenster, Dächer, etc.) so weit wie möglich zu reduzieren, um einen effizienten Betrieb der Wärmepumpen gewährleisten zu können. Ab einer Vorlauftemperatur von ca. 55 °C wäre Variante 4 wirtschaftlicher als Variante 5. Allerdings wird eine Absenkung der Vorlauftemperatur in den alten und denkmalgeschützten Gebäuden auf unter 55 °C als nicht realistisch eingeschätzt.

9 Handlungsempfehlung

Auf Basis des Variantenvergleichs (19.05.22) und der Wirtschaftlichkeitsberechnung empfiehlt die AutenSys, die folgende Variante umzusetzen:

- **Variante 5: Grundwasser-Wasser-Wärmepumpe, Holz-Kessel, PV**

Im Ergebnis weist diese unter Inanspruchnahme der Förderung die geringsten Wärmegeheimungskosten auf. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse hat sich der Vorteil von Variante 5 bestätigt. Zudem sind die CO₂-Emissionen dieser Variante am geringsten.

Der Vorteil in Variante 5 liegt darin, dass dabei zum Großteil lokal verfügbare Energieträger wie Umweltwärme aus dem Grundwasser genutzt werden können. Dies gewährleistet geringe laufende Kosten, einen hohen Grad an Unabhängigkeit und minimale CO₂-Emissionen. Durch den gänzlichen Verzicht auf fossile Energieträger kann hierbei eine nachhaltige und zukunftsorientierte Energieversorgung sichergestellt werden. Zudem bietet diese Variante den Vorteil der Erweiterbarkeit. Da die Heizzentrale außerhalb des Stadtkerns liegt, ist hier eine Vergrößerung der Infrastruktur deutlich einfacher möglich als im Stadtkern. Hierbei können ggf. Synergieeffekte mit den lokalen Unternehmen vor Ort generiert werden. Da viele Wohngebäude im Stadtgebiet perspektivisch ebenfalls auf eine regenerative Energieerzeugung umgestellt werden müssen, stellt der Anschluss an ein Nahwärmenetz für die Bewohner eine bequeme Alternative zur Einzelversorgung dar. Somit sollte schon im Voraus eine mögliche Erweiterung des Wärmenetzes mitgedacht werden.

Wichtig ist, dass vorab die hydrogeologischen Voraussetzungen für den Betrieb der Grundwasser-Wärmepumpen im Detail geprüft werden und der Genehmigungsprozess angestoßen wird. Darüber hinaus gilt es, die anzuschließenden Gebäude „Wärmepumpen-fit“ zu gestalten. Dies bedeutet, dass z.B. die alten Heizkörper gegen moderne ausgetauscht werden sollten, dass ein effizienter Betrieb der Wärmepumpen gewährleistet werden kann.

Insgesamt ist die AutenSys der Meinung, dass Variante 5 den Grundstein für eine ökologisch und ökonomisch nachhaltige und zukunftsorientierte Energieversorgung in Waldenbuch legen kann und empfiehlt daher deren Umsetzung anzustoßen.

Gerne unterstützen wir Sie im Rahmen einer Umsetzungsbegleitung bei der weiteren Vorgehensweise.