



Schlussbericht 06. Dezember 2010

Feldmonitoring und Analysen an Grosswärmepumpen

Phase 2

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Wärmepumpen, WKK, Kälte
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Hubacher Engineering
Tannenbergstrasse 2
9032 Engelburg

Autoren:

Peter Hubacher, dipl. Ing. HTL, Hubacher Engineering, he-ko@bluewin.ch
Carlos Bernal, Techniker, Hubacher Engineering
Max Ehrbar, Prof. Dr. Enertec AG, ehrbar.max@bluewin.ch

BFE-Bereichsleiter: Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

BFE-Programmleiter: Thomas Kopp, tkopp@hsr.ch

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 152'232 / 100'917

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	4
Abstract	5
1. Ausgangslage und Zielsetzungen	6
1.1 Ausgangslage	6
1.2 Zielsetzungen	7
1.3 Liste der untersuchten Anlagen	7
2. Methodik und Theorie	9
2.1 Methodik	9
2.2 Sensitivität	9
2.3 Laufzeiten	13
2.4 Auskühlverluste von Nahwärmeleitungen	15
3. Erkenntnisse	17
3.1 Wärmequellen	17
3.2 Unterstationen	20
3.3 Bivalente Anlagen mit Wärmepumpen	21
3.4 Warmwasserversorgung	23
3.5 Nahwärmenetze (zentrale oder dezentrale Wärmeerzeugung)	26
3.6 Betriebsregime (Heizgesetz, etc.)	27
3.7 Kosten (Investitionen)	28
4. Schlussfolgerungen	28
5. Zusammenfassung der Erkenntnisse	31
Literaturverzeichnis	33
Anhang A: Anlagenanalysen	34 - 115

Zusammenfassung

Mit den grossen Wärmepumpen wird trotz der eher kleineren Stückzahlen ein bedeutendes energetisches Potential abgedeckt. Somit ist es auch von öffentlichem Interesse, dass deren Effizienz möglichst hoch ist. Die bisherigen Erfahrungen lehren, dass die Jahresarbeitszahlen (JAZ) von Grosswärmepumpen meist deutlich unter den Werten von Kleinwärmepumpen liegen. Dies hat das Bundesamt für Energie (BFE) veranlasst, bei ausgeführten Grosswärmepumpen nach den Gründen für dieses Phänomen zu suchen.

Das Projekt wurde in zwei Phasen abgewickelt. In der ersten Phase wurden 10 Anlagen analysiert. Um die Erkenntnisse statistisch noch besser abzusichern, wurde eine zweite Phase mit zusätzlichen Anlagen gestartet. Die Ergebnisse der ersten Phase wurden im Wesentlichen bestätigt.

Neu ist die Erkenntnis, dass die Trennlinie zu „Kleinwärmepumpen“ nicht entlang der Wärmeleistung verläuft, sondern entlang der Anzahl der angeschlossenen Objekte. Es muss unterschieden werden zwischen Wärmepumpenanlagen für ein Objekt und Wärmepumpenanlagen für mehrere Objekte. Sobald mehrere Objekte im Spiel sind, treten gegenüber Ein-Objekt-Anlagen vier grundlegende Unterschiede auf, die auf die Jahresarbeitszahl einen grossen Einfluss haben und die (mit Ausnahme von Punkt 4) nur bei Mehr-Objekt-Anlagen auftreten:

- Die Wärmepumpen werden über ein Nahwärmenetz mit Wärme versorgt. Das Nahwärmenetz hat Wärmeverluste und beansprucht Pumpenenergie
- Wenn die Objekte mit dezentralen Wärmepumpen beheizt werden, jedoch über eine gemeinsame Wärmequelle verfügen (Grundwasser, Oberflächenwasser, Abwasser) entstehen JAZ-Minderungen (Verluste) durch die zugeführte Pumpenenergie.
- Wenn die Warmwasserversorgung ebenfalls zentral erfolgt, entstehen vor allem im Sommerbetrieb beträchtliche Auskühlverluste im Nahwärmenetz.
- Bei grösseren Wärmeleistungen sind die Wärmepumpen im Normalfall mehrstufig. Dies kann auch bei leistungsmässig grossen Ein-Objekt-Anlagen der Fall sein. Ohne Anpassung der Nebenantriebe an die Leistungsstufe der Wärmepumpe sinkt die Arbeitszahl im Teillastbetrieb deutlich.

Der Vergleich von Ein- und Mehrobjektanlagen zeigt im Mittel einen JAZ-Unterschied von 1.35 (Einobjekt-Anlagen JAZ=3.87, Mehrobjektanlagen JAZ=2.52). Allerdings muss einschränkend darauf hingewiesen werden, dass die Heizgesetze der Einobjektanlagen im Mittel tiefer liegen als bei den Mehrobjektanlagen. Die generelle Aussage wird dadurch jedoch nicht in Frage gestellt.

Auch bei den Warmwassersystemen ist die zentrale Wärmeerzeugung vor allem im Sommer energetisch sehr ungünstig, da die Wärme für das periodische Erwärmen des Nahwärmenetzes verloren ist.

Eine weitere Zielsetzung der Phase 2 bestand darin, wirtschaftliche Referenzdaten zu gewinnen, um beispielsweise Offerten beurteilen zu können. Leider reichten die zur Verfügung gestellten Unterlagen nur gerade bei 5 Anlagen zur Gewinnung entsprechender Daten.

Abstract

Even though large heat pump systems are not very common they represent an important energy potential. It is thus desirable that they are as efficient as possible. Experience to date has shown that the seasonal performance factor (SPF) of large heat pump installations is significantly lower than smaller installations. This has leaded the BFE to initiate an investigation into the reasons for this difference.

The project was split into 2 phases. In the first 10 heat pump systems were analysed. A second analysis with more heat pump systems was used to improve the statistical accuracy. The results of the second phase in all key points were identical to that of the first phase.

The major discovery is that the differentiator between small and large heat pump systems is not the heat capacity, but instead the number of connected buildings (complexity). One needs to differentiate between heat pump systems for a single building or for a building complex.

Four factors make up this difference.

- The heat pump supplies the buildings via a local heating network. This network has heat losses and requires pump energy for the distribution
- When decentralised heat pump system is supplied from a common sink/source (Ground, surface or waste water) are used, the SPF is reduced due to the pump energy required
- When the domestic hot water is centrally produced then significant heat losses are to be found in the distribution network (only in summer operation)
- Large heat pump systems are normally multistage. If the support systems are not regulated then under partial load the SPF sinks dramatically

The comparison shows that the average value of SPF for single buildings is 3.87 and for multiple buildings is 2.52 (local heat distribution network) and thus a difference of 1.35 (SPF). It is clear that the average operating system temperature for single building systems is lower than for multiple buildings. This however does not put the result of the analysis in question.

A centralised system for domestic hot water is not energy efficient under summer operating conditions due to the heat lost within the distributions network (system).

A further aim of phase 2 was to compile a price reference data bank to enable future large heat pump systems to be effectively classified for price vs. performance. Unfortunately data was only available for 5 heat pump systems.

1. Ausgangslage und Zielsetzungen

1.1 Ausgangslage

Die Erfahrung lehrt, dass die Jahresarbeitszahlen (JAZ) von Grosswärmepumpen meist deutlich unter den Werten von Kleinwärmepumpen liegen. Dies hat das Bundesamt für Energie (BFE) veranlasst, bei ausgeführten Grosswärmepumpen nach den Gründen für dieses Phänomen zu suchen.

Die vom BFE angestrebte Qualitätssicherung bei energetischen Produktionsanlagen muss insbesondere auch bei Grosswärmepumpenanlagen weiter verfolgt werden. Bei den Kleinwärmepumpen wird in Zusammenarbeit mit FWS¹ diese Strategie seit mehr als 10 Jahren erfolgreich betrieben.

Da bei Grosswärmepumpen immer noch bedeutend weniger technische und betriebliche Erfahrungen vorliegen, war es bisher nicht möglich irgendwelche Vergleiche und Beurteilungen vorzunehmen. Es fehlen sowohl technische und planerische Unterlagen, um die Fachbranche mit Qualitätssicherungsmassnahmen zu unterstützen. Besonders interessiert, welches die Ursachen für die teilweise unbefriedigenden Arbeitszahlen sind und welche planerischen und konzeptionellen Massnahmen getroffen werden müssen, um höhere Arbeitszahlen zu erreichen.

Eine grundsätzliche Frage ist, was versteht man unter dem Begriff „Grosswärmepumpen“? Sind es Wärmepumpenanlagen mit grosser Wärmeleistung, ab beispielsweise 100 kW? Die eingehende Beschäftigung mit diesem Thema hat bei den Autoren die Überzeugung ergeben, dass Grosswärmepumpen nicht (primär) über deren Leistung zu definieren sind, sondern über deren Komplexität. ***Es hat sich klar gezeigt, dass die Trennlinie zu „Kleinwärmepumpen“ nicht entlang der Wärmeleistung verläuft, sondern entlang der Anzahl der angeschlossenen Objekte. Es muss unterschieden werden zwischen Wärmepumpenanlagen für ein Objekt und Wärmepumpenanlagen für mehrere Objekte.*** Sobald mehrere Objekte im Spiel sind treten gegenüber Ein-Objekt-Anlagen vier grundlegende Unterschiede auf, die auf die Jahresarbeitszahl einen grossen Einfluss haben und die (mit Ausnahme von Punkt 4) nur bei Mehr-Objekt-Anlagen auftreten:

- Die Wärmepumpen werden über ein Nahwärmenetz mit Wärme versorgt. Das Nahwärmenetz hat Wärmeverluste und beansprucht Pumpenenergie
- Wenn die Objekte mit dezentralen Wärmepumpen beheizt werden, jedoch über eine gemeinsame Wärmequelle verfügen (Grundwasser, Oberflächenwasser, Abwasser) entstehen Verluste durch die Pumpenenergie
- Wenn die Warmwasserversorgung ebenfalls zentral erfolgt, entstehen vor allem im Sommerbetrieb beträchtliche Auskühlverluste im Nahwärmenetz.
- Bei grösseren Wärmeleistungen sind die Wärmepumpen im Normalfall mehrstufig. Dies kann auch bei leistungsmässig grossen Ein-Objekt-Anlagen der Fall sein. Ohne Anpassung der Nebenantriebe an die Leistungsstufen der Wärmepumpen sinkt die Arbeitszahl im Teillastbetrieb deutlich.

Diese vier Unterschiede sollen in dieser Arbeit speziell herausgearbeitet werden.

Dank der Unterstützung vom BFE konnten wir bereits mit der ersten Forschungsarbeit an Grosswärmepumpen (Phase 1, Lit. [2]) Analysen an 10 Grosswärmepumpen durchgeführt werden. Mit der Durchführung einer technischen und wo möglich auch wirtschaftlichen Analyse an bestehenden Grosswärmepumpenanlagen mit unterschiedlichen Anwendungen wurden Merkmale eruiert, die für gute und schlechte Arbeitszahlen ursächlich sind. Mit dieser Phase 2 können weitere Erkenntnisse aufgearbeitet werden. Aus den Erkenntnissen sollen Planungsrichtlinien für gute Wärmepumpen-Anlagen abgeleitet werden.

Das Vorgehen ist analog der ersten Phase und umfasst:

¹ Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz FWS, Homepage: www.fws.ch

- Feldmonitoring an Grosswärmepumpen (Analyse bestehender WP-Anlagen) auf Schwachpunkte.
- Systematische Darstellung von typischen ausgeführten Anlagen mit ihren Vor- und Nachteilen.
- Systemanalysen und Planungsunterlagen für Hersteller, Planer, Installateure und Betreiber
- Erarbeitung Kennzahlen für Beratung, Planung und Betrieb von Grosswärmepumpenanlagen
- Ev. Technisch-wirtschaftliche Kennzahlen als Richtschnur für Bauherren und Planer
- Schulungsunterlagen zuhanden der Fachbranche (Planer).

1.2 Zielsetzungen

Die energetische Effizienz einer Wärmepumpenanlage hängt bei Grosswärmepumpen in noch weit grösserem Masse als bei Kleinwärmepumpen von der Einbindung der Wärmepumpe ins Verteilsystem, den Randbedingungen der Wärmeverteilung und dem Betriebskonzept ab. Der Fokus der Analysen lag nicht bei den Wärmepumpen selbst, sondern bei deren Einbindung ins Heizsystem.

Die Analyse wurde deshalb vermehrt über diese Themen durchgeführt und weniger direkt die Wärmepumpe beurteilt.

Die Analyse hat zur Zielsetzung möglichst Schwerpunktthemen aufzugreifen, die die Effizienz von Grosswärmepumpenanlagen positiv oder eben auch negativ beeinflussen.

Die im Bericht abgehandelten Schwerpunktthemen wurden im Hinblick auf die zukünftige Schulung von Wärmepumpenfachleuten aufgegriffen. Praktiker sprechen erfahrungsgemäss vor allem auf Beispiele an. Dies kann mit dieser systematischen Analyse ausgeführter Anlagen und der Diskussion von Vor- und Nachteilen in idealer Weise verwendet werden.

Unsere ursprüngliche Ansicht war, die Analyse und Auswertung allein auf Basis der Erhebungen beim Kunden, also durch erfasste Zahlen durchführen zu können. In der Praxis zeigte es sich jedoch rasch, dass in den wenigsten Fällen alle Zahlen zur Verfügung standen, die wir eigentlich für eine umfassende Auswertung benötigt hätten. Es zeichnete sich ebenso rasch ab, dass die Auswertungen durch entsprechende Theorien abgestützt werden mussten. Diese Theorien erlaubten es dann auch, Lücken in den Unterlagen auszufüllen und systematische Untersuchungen über Abhängigkeiten zu machen.

Nach dem Abschluss der zweiten Phase sollte nun genügend Material vorliegen, um für die Fachbranche diese Informationen für Schulung, resp. Workshop's ausarbeiten zu können.

1.3 Liste der untersuchten Anlagen

Es wurde in zwei Phasen insgesamt 24 solcher Wärmepumpenanlagen analysiert. Das Ziel der Untersuchung besteht darin, konzeptionelle Fehler zu erkennen und Planungsgrundlagen zu schaffen, um zukünftige Anlagen energetisch besser zu konzipieren, sprich höhere JAZ zu erreichen. Gleichzeitig sollten auch wirtschaftliche Kennzahlen ermittelt werden, um Referenzwerte für die Grobbeurteilung der Kosten von Neuanlagen zu erhalten. Die Untersuchungen wurden, soweit möglich, getrennt nach Heizwärme und Warmwasser aufgeteilt.

Dabei wurde das oben genannte Phänomen der niedrigen JAZ bestätigt. Es wurden folgende Jahresarbeitszahlen für Heizung und Warmwasser ermittelt:

Tab. 1: Gemessene Jahresarbeitszahlen von Grosswärmepumpen

1. Serie (Phase 1)

	Wärmequelle	Nennleistung WP	JAZ WP	JAZ Anlage
4000	Erdwärmesonden	342	3.83	3.24
4001	Gereinigtes Abwasser	380	4.07	2.78
4002	Erdwärmesonden mit reinem Wasser	128+33	4.46	4.34
4003	Grundwasser	605	3.46	3.16
4004	Grundwasser	320	3.05	2.83
4005	Grundwasser	120	3.55	3.35
4006	Grundwasser	220	3.58	3.13
4007	Grundwasser	160	5.78	3.56
4009	Erdwärmesonden	186	3.12	2.86
4010	Gereinigtes Abwasser	2400	3.59	3.12
	<i>Minimum</i>		3.05	2.78
	<i>Mittelwert</i>		3.78	3.11
	<i>Maximum</i>		5.78	3.56

2. Serie (Phase 2)

	Wärmequelle	Nennleistung [kW]	JAZ WP	JAZ Anlage
4020	Erdwärmesonden	240 (300) ²	3.42	3.02 ³
4022	Gereinigtes Abwasser	1710 ⁴	3.42	2.14
4023	Frischwasser (Grundwasser)	244	3.56	2.61
4024	Erdwärmesonde/Luft	128 ⁵	2.90	2.54
4025	Grundwasser	320	3.32	2.26
4026	Kühlwasser r ⁶	125	4.33	4.33
4027	Seewasser	156	3.47	3.47
4029	Grundwasser ⁷	218	4.76	3.81 ⁸
4030	Grundwasser	525	2.33	2.07
4031	Grundwasser	264 (900) ⁹	2.68	2.30
4032	Schmutzwasser	586	2.66	1.88
4035	Gereinigtes Abwasser	806	4.17	3.88
4036	Grundwasser	300	3.29	2.67
4038	Gereinigtes Abwasser	130	4.83	3.45
	<i>Minimum</i>		2.33	1.88
	<i>Mittelwert</i>		3.51	2.89
	<i>Maximum</i>		4.83	4.33

Es war, wie schon bei der ersten Serie, teilweise sehr schwierig, an die notwendigen Unterlagen heranzukommen. Die Bereitschaft zur Herausgabe von Unterlagen war unterschiedlich und reichte von unproblematisch bis zur Abschottung. Was uns auch erstaunt hat, war die meist sehr unvollständige Bestückung mit Unterlagen bei der Bauherrschaft. In einem Fall war es selbst der Bauherrschaft unmöglich, dem planenden Ingenieurbüro die fehlenden Unterlagen „auszureissen“. Diese Anlagen mussten wir dann wohl oder übel von der Liste streichen, resp. die bereits getätigten Vorarbeiten abschreiben.

² In Klammern Oel- oder Gaskessel)

³ Die Nahwärmeverluste konnten nicht bestimmt werden. Daher ist die JAZ Anlage effektiv geringer.

⁴ Zusätzlich bei einigen Anlagen Heizkessel

⁵ Zusätzlich Holzkessel 110 kW und Oelkessel 250 kW, beide kaum genutzt

⁶ Ein-Objekt-Anlage

⁷ Ein-Objekt-Anlage

⁸ Minderung der JAZ wird durch Quellenanlage bewirkt. Kein Nahwärmenetz.

⁹ Anteil Wärmepumpe an Jahreswärmeproduktion: 42%

2. Methodik und Theorie

2.1. Methodik

Wie eingangs erwähnt wird, sollen im Bereich Grosswärmepumpen eine Anzahl von bestehenden Anlagen genauer analysiert werden, um die Gründe für gute oder schlechte Arbeitszahlen zu eruieren und Bau- resp. Systemempfehlungen für Hersteller und Planer abgeben zu können. Die Arbeitsgemeinschaft hat dazu bei 35 Anlagen angefragt, davon wurden von 23 Anlagen die technischen Unterlagen geprüft. Am Schluss blieben 20 Anlagen, die für die Analyse evaluiert werden konnten. Diese Anlagen wurden alle besucht und deren technische Daten untersucht und beurteilt. Auswertbar waren schlussendlich 14 Anlagen.

Für die Auswahl der Anlagen wurden folgende Kriterien herangezogen:

- Wenn möglich P+D-Anlagen, von denen bereits Leistungsdaten bekannt sind
- Möglichst verschiedene Wärmeverteilnetze und auch Einzelobjekt-Anlagen
- Anlagen mit verschiedenen Wärmequellen Grundwasser, Erdwärme und Abwasser
- Verschiedene Konzepte zur Warmwasseraufbereitung

Aufgrund der in Phase 1 analysierten Themen und der vorherrschenden Situation, die sich während der Analyse der Phase 2 ergeben hat, haben wir folgende Themen aufgegriffen:

- Wärmequellen
- Unterstationen
- Bivalente Anlagen mit Wärmepumpen
- Warmwasserversorgung
- Nahwärmenetze (zentrale oder dezentrale Wärmeerzeugung)
- Betriebsregime (Heizgesetz, etc.)
- Kosten (Investitionen, Betrieb)

Neben der planerischen Analyse des Ist-Zustandes werden womöglich auch Verbesserungsmöglichkeiten resp. die Ursachen von schlechten JAZ bei Wärmepumpen *anlagen* aufgezeigt. Dabei sind zwei Kategorien von Ursachen zu unterscheiden. Einerseits sind es unnötige Stromverbräuche von Nebenantrieben und Wärmeverluste in Nahwärmenetzen, andererseits sind es thermodynamisch bedingte Minderungen der Jahresarbeitszahlen (Exergieverluste).

2.2. Sensitivität

Thermodynamisch bedingte Minderungen der Jahresarbeitszahlen rühren i.a. davon her, dass betrieblich zu hohe Vorlauftemperaturen oder zu niedrige Quellentemperaturen gefahren werden. Beides führt zu höheren Temperaturhuben und damit zu tieferen Leistungs- und Arbeitszahlen. Zu hohe Temperaturhübe entstehen beispielsweise durch Trenn-Wärmetauscher in den Unterstationen oder den Quellenanlagen, durch Wärmeverluste in Nahwärmenetzen (die durch eine höhere Vorlauftemperaturen ab Kondensator kompensiert werden müssen), durch falsch eingestellte resp. gewählte Heizkurven, durch falsche Speicherladekonzepte etc.

Die Auswirkungen dieser temperaturbedingten Ursachen lassen sich relativ einfach beziffern. Wir haben die Typenprüfungen einer Reihe von Wärmepumpen herangezogen, um die Sensitivität der COP und JAZ bezüglich des Temperaturhubes zu eruieren. Die Formeln für die Definition der Mittelwertkurven sind in den Abb. 2 für Sole/Wasser und Wasser/Wasser-Wärmepumpen ersichtlich.

Das Ergebnis ist in Abb. 1 dargestellt.

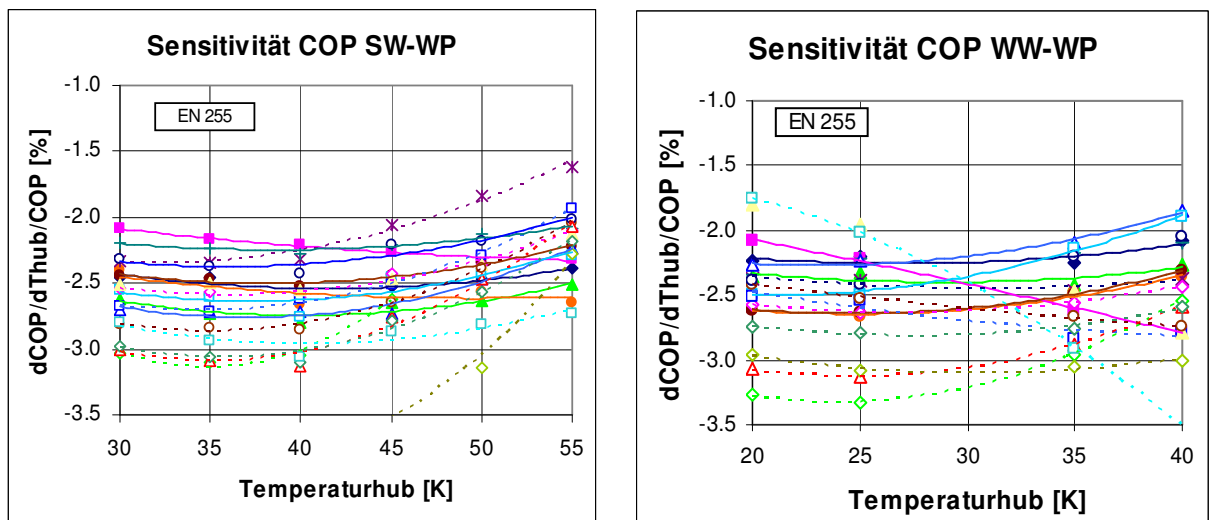


Abb. 1: Sensitivitäten des COP-Werte bezüglich einer Änderung des Temperaturhubes

Der Mittelwert dieser Sensitivitäten liegt um 2.50% bei Wasser/Wasser-Wärmepumpen resp. 2.54% bei Sole/Wasser-Wärmepumpen. Da die Sensitivitäten der in diesem Projekt untersuchten Grosswärmepumpenanlagen nicht genau bekannt sind, haben wir die möglichen Verbesserungen mit diesem Mittelwert veranschlagt. Es muss beachtet werden, dass alle diese typengeprüften Wärmepumpen mit Scroll-Kompressoren ausgerüstet sind. Die Charakteristik eines Kompressors geht in die Sensitivität ein. So weisen insbesondere ventilgesteuerte Kompressoren (Hubkolben, Rollkolben) eine geringere Sensitivität auf. Bei den Grosswärmepumpen werden meistens Hubkolbenkompressoren verwendet. Deshalb sind bei Grossanlagen die COP- resp. AZ-Verläufe flacher als bei den typengeprüften Maschinen.

Interessant sind auch die absoluten COP-Werte der typengeprüften Maschinen (Abb. 2).

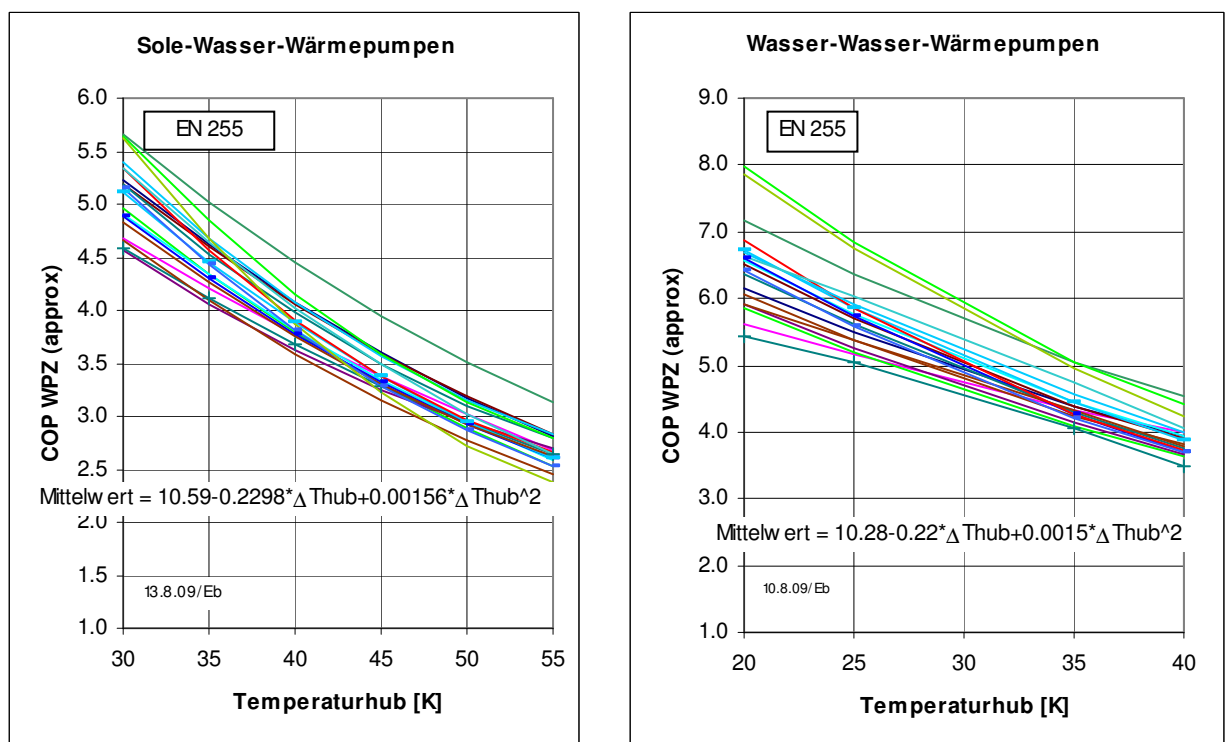


Abb. 2: COP-Werte von Wasser-Wasser- und Sole-Wasser-Wärmepumpen gemäss Typenprüfung WPZ Buchs und Töss [2].

Wir haben für die 19 untersuchten Anlagen einen Mittelwert des COP-Verlauf in Abhängigkeit vom Temperaturhub erstellt.

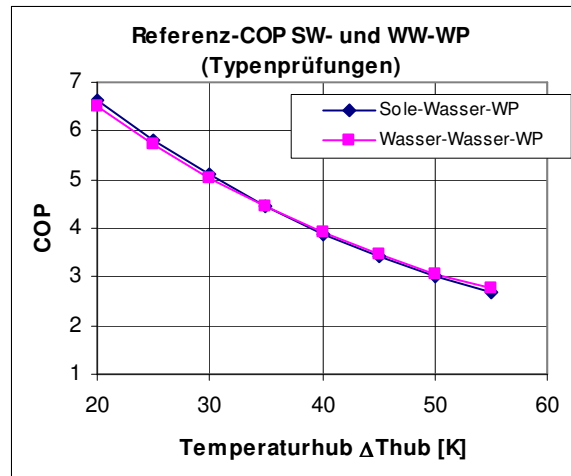


Abb. 3: Mittelwert des COP-Verlaufs der je 19 typengeprüften Anlagen in Abhängigkeit vom Temperaturhub

Abb. 3 dient uns als Referenz für die untersuchten Anlagen. Man erkennt, dass die COP-Werte für WW-WP und SW-WP bei identischen Temperaturhüben nahe beieinander liegen.

Die Leistungszahlen einer Wärmepumpe, heute meist als COP (coefficient of performance) bezeichnet, sind das Verhältnis von erzeugter Wärmeleistung und elektrischem Stromverbrauch (bei Elektro-WP). Diese gelten für festgehaltene Randbedingungen, d.h. insbesondere für festgehaltene Vorlauf- und Quellentemperaturen. Ebenso werden die Massenströme der Quelle und Senke konstant gehalten. Die Arbeitszahlen (AZ) hingegen sind Quotienten aus Wärmeproduktion und elektrischer Stromaufnahme während einer Zeitperiode (wenn die betrachtete Zeitperiode ein Jahr beträgt, spricht man Jahresarbeitszahl JAZ). In dieser Zeitperiode ändern i.a. die Quellen- und Vorlauftemperaturen ständig. Bei den COP werden *Leistungen* ins Verhältnis gesetzt, während es bei den Arbeitszahlen *Energiemengen* sind. Wenn man nun in einer Feldmessung die Energiemengen beispielsweise für einen Monat misst und gleichzeitig die mittleren Vorlauf- und Quellentemperaturen festhält, so kann man die so ermittelte Arbeitszahl näherungsweise als COP für die in der Zeitperiode gemessenen Mittelwerte von Vorlauf und Quelle betrachten.

Dazu sind allerdings einige weitere Bemerkungen notwendig. Die Typenprüfungen berücksichtigen die Nebenantriebe auf der Quellen- und Senkenseite nur unvollständig, indem deren Pumpenstromaufnahme einfach durch die Multiplikation von Druckverlust über den Wärmetauschern mal dem Volumenstrom und dividiert durch 0.3 (Wirkungsgrad der Pumpen) berechnet wird. Dieser Stromverbrauch wird dem Stromverbrauch des Kompressors zugeschlagen. Dies macht je etwa 1 % bei Quelle und Senke aus.

In der Praxis sind die Stromverbräuche der Pumpen weit höher. Bei Erdwärmesondenanlagen liegt der Stromverbrauch der Solepumpe bei ausgeführten Anlagen bei etwa 13 % der Kompressorleistung. Dadurch liegen die COP-Werte (und die AZ-Werte) in der Praxis um etwa 12 % tiefer als gemäss Typenprüfung. Da Nebenantriebe, sofern sie nicht leistungsge-regelt sind, stets die gleiche Strommenge aufnehmen, „dämpfen“ sie auch die Sensitivitäten um etwa 10 %. Bei den AZ ist zu berücksichtigen, dass etwa die Anlaufverluste beim Starten der Wärmepumpe enthalten sind, was bei den Typenprüfungen nicht der Fall ist. Auch das führt dazu, dass die im Feld gemessenen Arbeitszahlen i.a. tiefer als die entsprechenden COP-Werte aus den Typenprüfungen sind.

Beim Vergleich von Typenprüfungen und Feldmessungen müssen daher die Energieverbräuche der Nebenantriebe sauber herausgearbeitet werden.

Bei den untersuchten Wasser-Wasser-Wärmepumpen liegt der Strombedarf der Quellen- und (sofern vorhanden) Zwischenkreispumpe zwischen 5.6 und 25.2% der Stromaufnahme

des Kompressors (Tab. 2). Ausreisser nach oben ist Anlage 4022, bei der allerdings erst die Hälfte der geplanten Anschlussleistung realisiert ist.

Tab. 2: Leistungsanteil der Grundwasserpumpen

Anlage	Quellentyp	Stromverbrauch Kompressor pro Jahr [kWh]	Stromverbrauch Quellenanlage pro Jahr [kWh]	Anteil Pumpenergie (bezogen auf die Stromaufnahme des Kompressors) [%]
4020	EWS	164'368	21'700	13.2
4022	Gereinigtes Abwasser	502'000	301'000	60.0
4023	Frischwasser (Grundwasser)	110'508	22'900	20.7
4024	EWS+Luft	129'266	4'531	3.5
4025	Grundwasser	98098	22'900	23.3
4026	Kühlwasser	65'905	3800	5.8
4027	Seewasser	160'670	5300	3.3
4029	Grundwasser	55'487	14'000	25.2
4030	Grundwasser	207'261	11'684	5.6
4031	Grundwasser	253'628	28'710	11.3
4032	Schmutzwasser	213'300	22'500	10.5
4035	Gereinigtes Abwasser	273'480	25'887	9.5
4036	Grundwasser	137'634	20'846	15.1
4038	Gereinigtes Abwasser	118'138	20'135	17.0

Es stellt sich die Frage, ob die in Abb. 1 genannten COP-Sensitivitäten auch für die Jahresarbeitszahlen gelten. Die Sensitivitäten variieren je nach Temperaturhub. Die Sensitivitäten der Jahresarbeitszahlen liegen „irgendwo“ zwischen der minimalen und der maximalen Sensitivität nach Abb.1. Um die Wirkung von Verbesserungsmassnahmen aufzuzeigen, genügt es mit einem mittleren Wert für die Sensitivität zu rechnen. Damit wird zwar der absolute Wert der JAZ-Verbesserung nicht exakt wiedergegeben, jedoch auf alle Fälle die Grössenordnung.

Der Einfluss des Temperaturhubes auf die Jahresarbeitszahlen kann auf zwei Wegen erfolgen. Entweder rechnet man die Stromaufnahme der Nebenantriebe aus dem Jahresstromverbrauch heraus und korrigiert diesen Stromverbrauch je Kelvin Temperaturhub um 2.5 % (genauere Methode), oder man korrigiert den Gesamtstromverbrauch (also Kompressor *und* Nebenantriebe) mit einer reduzierten Sensitivität von etwa 2.25%. Bei den vorliegenden Untersuchungen werden die Stromverbräuche der Nebenantriebe eruiert (durch Messungen oder rechnerisch). Daher können wir die exaktere erste Methode anwenden.

Die Sensitivitäten sind auch vom Kompressortyp abhängig. Die in Abb. 2 und 3 aufgeführten Werte stammen aus Typenprüfungen an kleineren Wärmepumpen, die allesamt mit Scrollkompressoren ausgerüstet sind. Grössere Wärmepumpen sind meist mit Hubkolbenkompressoren oder Schraubenkompressoren ausgestattet, deren Leistungscharakteristiken anders als bei Scrollkompressoren verlaufen. Dies lässt sich am einfachsten anhand der spezifischen elektrischen Arbeit w_e aufzeigen. Die spezifische elektrische Arbeit ist die elektrische Energiezufuhr zum Kompressor pro kg verdichteten Kältemittels:

$$w_e \equiv \frac{P_{el}}{\dot{m}_R} \quad (1)$$

Die Abb. 4 zeigt den Verlauf der spezifischen elektrischen Arbeit für einen Scroll- und einen Hubkolbenkompressor.

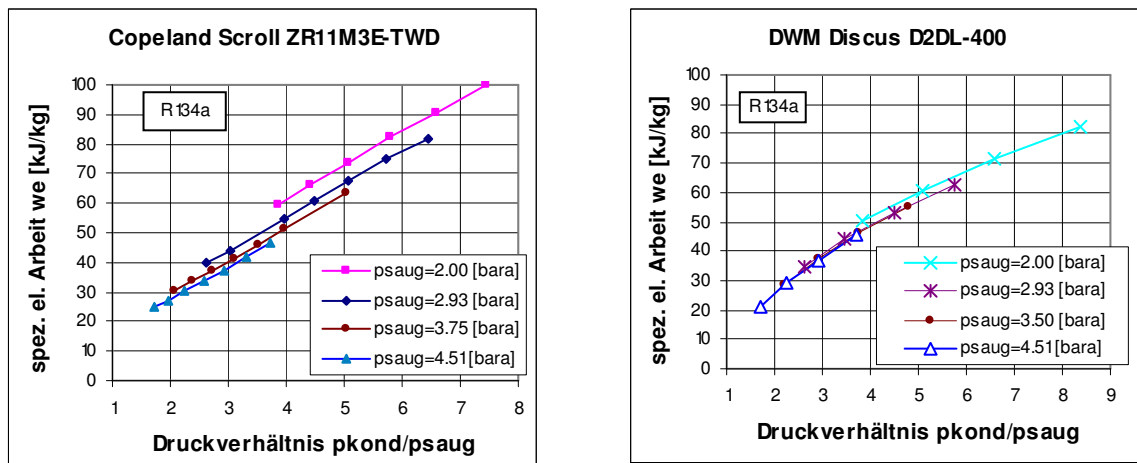


Abb. 4: Spezifische elektrische Arbeit für einen Scroll- und einen Hubkolbenverdichter

Während bei ventillosen Kompressoren (Scroll, Schraube) die spezifische elektrische Arbeit w_e praktisch linear mit dem Druckverhältnis ansteigt, verläuft dasselbe bei ventilgesteuerten Maschinen (Hubkolben, Rollkolben) mit steigendem Druckverhältnis zunehmend flacher. Dieses Verhalten führt zu einem flacheren Abfall des COP mit zunehmendem Temperaturhub.

Die massgebliche Grösse zur energetischen Beurteilung einer Wärmepumpenanlage ist die Jahresarbeitszahl (JAZ). Sie ist das Verhältnis der produzierten Nutzwärme (Heizung und Warmwasser) zur aufgenommenen elektrischen Energie. Dabei unterscheiden wir zwei verschiedene Jahresarbeitszahlen:

- JAZ_{WP} : Verhältnis der produzierten Wärme der Wärmepumpe und der aufgenommenen elektrischen Energie des Kompressors (im Schlussbericht Grosswärmepumpen 1 mit JAZo bezeichnet).
- JAZ_{Anlage} : Verhältnis des Wärmebedarfs der Anlage zur aufgenommenen elektrischen Energie von Kompressor und allen Nebenantrieben der Wärmepumpe (Pumpen der Quellenanlage, Steuerung)

Letztere Variante ist die entscheidende Grösse zur Beurteilung der energetischen Effizienz einer Anlage und zur Berechnung der Betriebskosten einer Wärmepumpenanlage. Die beiden ersten Definitionen dienen der inneren Beurteilung der Wärmepumpe.

2.3. Laufzeiten

Wenn die Energieaufnahme der Nebenaggregate nicht mittels Elektrozählern individuell erfasst wird, (was kaum je der Fall ist), kann alternativ die Berechnung der Energieaufnahmen der diversen Nebenaggregate über deren Laufzeiten und Nennleistungen ermittelt werden.

Grundwasserpumpen

Zur Erläuterung der Methodik wählen wir den Fall einer 4-stufigen Wärmepumpe mit zwei Grundwasserpumpen. Die Wärmepumpenanlage besteht aus zwei Wärmepumpen mit je zwei Kompressoren. Jeder Wärmepumpe ist eine Grundwasserpumpe zugeordnet. Die Grundwasserpumpen arbeiten immer dann, wenn mindestens eine Wärmepumpe aktiv ist. Auf Grund der Wärmeproduktion beider Wärmepumpen kann das Intervall der Laufzeit je WP berechnet werden:

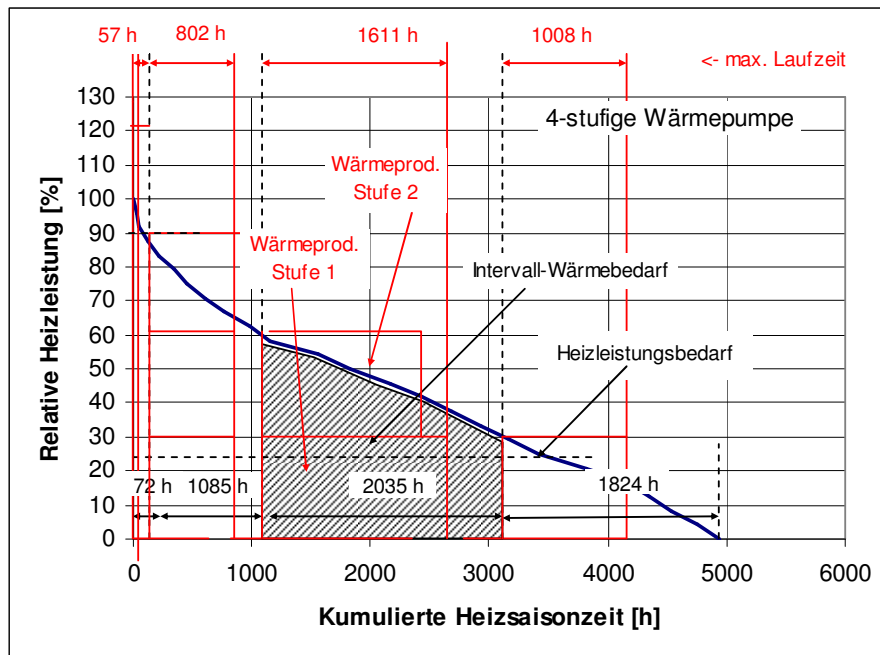


Abb. 5: Laufstunden der Wärmepumpen von Anlage 4036 im Heizbetrieb.
Da Minergiestandard befindet sich die obere Heizgrenze bei etwa 12 °C.

Abb. 5 zeigt den normierten, d.h. auf die Auslegeleistung (100%) bezogenen Verlauf der Wärmebedarfsleistung für die *Raumwärme* für das Schweizer Mittelland. Die Wärmeleistung der 4 WP-Stufen beträgt 336 kW bei 275 kW Auslegeleistungsbedarf für die Raumwärme. Die Wärmeleistung der WP beträgt somit rund 120 % des Auslegebedarfes. Jede Stufe leistet also 30% des Auslegebedarfes. Wir nehmen als Beispiel das Leistungsintervall 30 bis 60% der Auslegeleistung (Intervall 3). Die schraffierte Fläche zeigt den Wärmebedarf zwischen 30 und 60 % der Auslegeleistung (93'420 [%-h]). Dieses Intervall dauert 2035 h. Dies ist aber nicht die Laufzeit der Wärmepumpe. Wegen Sperrzeiten (3 h) und Warmwasseraufladung (2 h) kann die Wärmepumpe pro Tag maximal 19 Stunden für die Heizwärme arbeiten. Für die Bereitstellung der benötigten Heizwärme stehen der Wärmepumpe also maximal 19/24 der Intervallzeit zur Verfügung, also 1611 h. Die Wärmeabgabe der Wärmepumpe wird durch die beiden roten Rechtecke wiedergegeben. Die schraffierte schwarze Fläche (= Wärmebedarf) und die Fläche der beiden roten Vierecke (= Wärmeproduktion) müssen identisch sein.

Tab. 3: Berechnung der Laufstunden für das Intervall 3

	Wärmebedarf, resp. Wärmeproduktion [%-h]	Intervallzeit resp. Laufzeit [h]
Intervall 3	93'420	2035
Stufe 1	48'330 (= 1611 [h]*30 [%])	1611 (= 19/24 v. 2035 [h])
Stufe 2	45'090 (= 93'420-48330 [%-h])	1503 (= 45090 [%-h]/30 [%])

Ausgehend von der Intervallzeit wird im ersten Schritt die maximal mögliche Laufzeit der Wärmepumpen bestimmt. Die Wärmeproduktion der 1. Stufe ergibt sich aus der maximalen Laufzeit (1611 h) und deren Leistungsanteil von 30%. Die Wärmeproduktion der zweiten Stufe ergibt sich als Differenz von Wärmebedarf und Wärmeproduktion der ersten Stufe. Die Laufzeit der zweiten Stufe wiederum berechnet sich aus deren Wärmeproduktion dividiert durch deren Leistungsanteil von 30 %.

Die anderen Leistungsintervalle werden analog behandelt. Die zugehörigen Laufstunden sind in der Tabelle 4 ersichtlich.

Tab. 4: Intervallzeiten und Laufstunden der Wärmepumpen

Leistungsstufe	Intervallzeit [h/a]	Max. Laufzeit Wärmepumpe [h/a]	Laufzeit Grundwasserpumpe 1 [h/a]	Laufzeit Grundwasserpumpe 2 [h/a]
4-stufig	72	57	859	859
3-stufig	1085	802		
2-stufig	2035	1611	2619	0
1-stufig	1825	1444 ¹⁰		
Total Heizung	4944		3478	859
Warmwasser	730	730	730	730
Total			4208	1589

Wenn man Abb. 5 genau betrachtet, so fällt auf, dass die Laufzeit der 3. Stufe ebenfalls der maximal möglichen Laufzeit entspricht. Das mag auf den ersten Blick erstaunen. Man bedenke aber, dass wegen der gegenüber der Intervallzeit um rund 20% verkürzten Laufzeit die einzelnen Stufen weniger Wärme produzieren als bei Ausnützung der vollen Intervallzeit. Dies muss durch die dritte Stufe kompensiert werden. Im vorliegenden Fall ist es so, dass zur Deckung des Wärmebedarfs von Intervall 2 sogar die vierte Stufe kurze Zeit arbeiten muss. Die Grundwasserpumpe 1 arbeitet immer, wenn mindestens einer der beiden Kompressoren der Wärmepumpe 1 in Betrieb ist. Analog arbeitet Grundwasserpumpe 2, wenn einer der beiden Kompressoren der Wärmepumpe 2 aktiv ist.

Nahwärmenetzpumpen

Die Nahwärmenetzpumpen arbeiten in der ganzen Heizsaison und zusätzlich im Sommer für die Warmwasserproduktion. Im oben geschilderten Fall handelt es sich um Gebäude mit Minergiestandard. Die Heizsaison dürfte also maximal 7 Monate oder rund 5000 Stunden dauern. Damit verbleibt für die Sommersaison (nur Warmwasserbetrieb) 5 Monate resp. 3760 Stunden.

Im Heizbetrieb arbeiten die Nahwärmenetzpumpen ununterbrochen, also rund 5000 h. Für den Warmwasserbetrieb im Sommer gehen wir von 2 Stunden Ladezeit pro Tag aus, wobei auf Grund der Auslegung vermutlich beide Wärmepumpen in Betrieb sind. Aus diesen Annahmen ergibt sich eine Laufzeit der Nahwärmenetz- und Grundwasserpumpen von rund 300 Stunden im Sommerbetrieb.

Auf diese Weise können die Laufzeiten der Quellen- und Nahwärmenetzpumpen näherungsweise bestimmt werden.

2.4. Auskühlverluste von Nahwärmeleitungen

Nach dem Laden der dezentralen Warmwasserspeicher kühlt das Nahwärmenetz wieder aus. Die Abkühlkurve kann wie folgt ermittelt werden

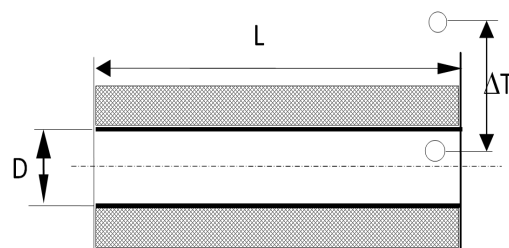


Abb. 6: Rohrstück des Nahwärmenetzes

¹⁰ Die effektive Laufzeit der Stufe 1 ist geringer als die maximal mögliche, da für die Deckung des Wärmebedarfs im Intervall 4 nur 1008 statt 1444 Laufstunden nötig sind.

Die Energiebilanz des Rohstücks ΔL lautet:

$$\dot{Q} = k * A * \Delta T = -m * c_p * \frac{d(\Delta T)}{dt} \quad (1)$$

Hier bedeuten:

\dot{Q}	Wärmestrom vom Wasser auf die Umgebung im Rohrstück L
k	Wärmedurchgangswert der isolierten Rohrleitung, bezogen auf das Rohrinne
A	Innere Oberfläche des Rohrstücks L
T	aktuelle Temperatur des Wassers in der Rohrleitung
ΔT	Temperaturdifferenz zwischen Wasser (T) und Umgebung (T_u) (z.B. Erdreich) = $T - T_u$
m	Masse des Wassers im Rohrstück
c_p	spezifische Wärme des Wassers

Eine Umformung von Gleichung (1) mit dem Ziel einer Variablentrennung von ΔT und t führt auf:

$$\frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -\frac{k * A}{m * c_p} * dt = -\frac{k * D * \pi * L}{\rho * D^2 * \frac{\pi}{4} * c_p * L} * dt = -\frac{k * 4}{\rho * D * c_p} * dt \quad (2)$$

Die Auflösung von (2) ergibt mit $T - T_u = \Delta T$ und $T_{\text{start}} - T_u = \Delta T_{\text{start}}$:

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{\Delta T}{\Delta T_{\text{start}}}\right) &= -\frac{k * 4 * t}{\rho * D * c_p} \\ \Rightarrow \Delta T(t) &= \Delta T_{\text{start}} * \exp\left(-\frac{k * 4 * t}{\rho * D * c_p}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

Hier bedeuten:

ΔT_{start}	Starttemperatur der Auskühlung (Differenz zwischen Mittelwert Vor-/Rücklauf und Erdreich zu Beginn der Abkühlung)
ρ	Dichte von Wasser

Der Auskühlverlust des Nahwärmenetzes hängt von der Auskühlzeit zwischen zwei Warmwasserladungen ab. Es kann pro Ladevorgang wie folgt berechnet werden:

$$Q_{\text{Ausk}} = m * c_p * (T_{\text{start}} - T_{\text{ende}}) = m * c_p * (\Delta T_{\text{start}} - \Delta T_{\text{ende}}) \quad (4)$$

Bei zwei zeitlich gleich verteilten Ladevorgängen pro Tag von 2 Stunden Dauer, beträgt die Abkühlzeit 10 Stunden. Laut untenstehender Abbildung würde sich ein Rohr mit Nennweite 65 mm in dieser Zeit von 48 auf 31.7 °C abkühlen. Pro Meter Rohr beträgt dann der Wärmeverlust:

$$Q_{\text{Ausk}} = 3.85 * 4.187 * (48 - 31.7) = 262.6 \text{ [kJ]} \quad (5)$$

Beim Aufladen des Nahwärmenetzes wird der Heizungsspeicher mit aufgeladen. Dessen Volumen ist zwar in Bezug auf dasjenige des Nahwärmenetzes beträchtlich. Jedoch ist das Verhältnis von Oberfläche zu Inhalt wesentlich kleiner als bei den Rohren. Daher kühlen die Speicher viel langsamer aus als das Nahwärmenetz.

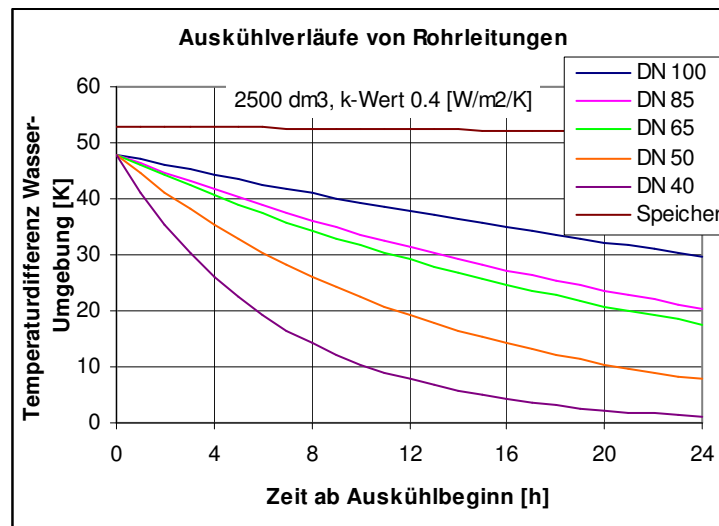


Abb. 7: Auskühlverläufe für verschiedene Rohr-Nennweiten mit Normisolation (Starttemperaturdifferenz 48 K für die Rohre und 53 K für den Speicher).

3. Analyse und Erkenntnisse

3.1 Wärmequellen

Grundwasser

Die Problematik der richtigen Auslegung von Grundwasseranlagen wurde schon im Projekt Grosswärmepumpen 1 behandelt [1].

Bei den untersuchten 14 Anlagen waren folgende Wärmequellen im Einsatz:

Tab.5: Wärmequellen der untersuchten Anlagen

Anlage	Wärmequelle
4020	Erdwärmesonden
4022	Gereinigtes Abwasser
4023	Trinkwasser (Grundwasser)
4024	Erdwärmesonden und Luft
4025	Grundwasser
4026	Kühlwasser
4027	Seewasser, alpin
4029	Grundwasser
4030	Grundwasser
4031	Grundwasser
4032	Ungereinigtes Abwasser
4035	Gereinigtes Abwasser
4036	Gereinigtes Abwasser
4038	Gereinigtes Abwasser

Die Anlagen mit Erdwärmesonden zeigten keine Auffälligkeiten und werden hier nicht speziell behandelt.

Bei den Grundwasser-Wärmepumpen zeigen vier von fünf Anlagen konzeptionelle Auffälligkeiten, die hier genauer diskutiert werden. Bei Anlage 4023 wird als Wärmequelle eine ausser Betrieb genommene Trinkwasserversorgung genutzt. Mittels einer Pumpe wird die Wasserzuführung zur Wärmepumpe auf 2.5 bar angehoben, jedoch vor den Wärmepumpen auf

1.0 bar gedrosselt. Jede der zweistufigen Wärmepumpen hat eine eigene Drosseleinrichtung. Der Wasserdurchfluss durch den Verdampfer ist unabhängig von der Anzahl aktiver Kompressoren der gleiche. Dieses Konzept verursacht nicht nur grosse Quellwasserverbräuche, sondern auch hohen elektrischen Stromkonsum durch die Frischwasserpumpe.

Bei Anlage 4025 werden zwei Wärmepumpen mit je zwei Leistungsstufen (Kompressoren) von einer einzigen Grundwasserpumpe versorgt. Die Wassermengen sind zudem recht hoch gewählt. Bei einer separaten Messung wurde festgestellt, dass die Temperaturspreizung des Grundwassers bei einer laufenden Maschine (beide Kompressoren arbeiten) nur 1.46 K beträgt (die stillstehende Maschine wird ebenfalls durchströmt). Würden beide Wärmepumpen arbeiten, wäre die Temperaturspreizung etwa 2.9 K. Die Wassereintrittstemperatur beträgt rund 10 °C. In einem solchen Falle sollten mindestens zwei Grundwasserpumpen vorgesehen werden, je eine pro Wärmepumpe. Damit könnte quellenseitige Stromaufnahme stark reduziert werden. Die Temperaturspreizung könnte etwas höher gewählt werden, wodurch sich die notwendige Pumpenleistung und der Wasserverbrauch nochmals reduzieren würden.

Bei der Anlage 4029 besteht ein Widerspruch. Seitens des Betreibers wird ein Grundwasserspiegel von -90 m unter Terrain angegeben. Seitens des WP-Lieferanten wird die Wassermenge durch die beiden Verdampfer mit zusammen 30 m³/h angegeben, der Druckverlust im Verdampfer mit 17 kPa. Rechnerisch ergäbe dies eine notwendige Förderhöhe der Grundwasserpumpe von 91.7m und eine hydraulische Leistung von 7.6 kW, resp. 15.2 kW unter Berücksichtigung eines Pumpenwirkungsgrades von 50 %. Die Grundwasserpumpe wird jedoch mit nur 4 kW angegeben. Gemäss Aussagen handelt es sich vermutlich um gespanntes Wasser, das ohne Pumpenenergie nach oben fliesst.

Bei Anlage 4031 liegt der Grundwasserspiegel etwa 35 m unter der Wärmepumpe. Obwohl die Wärmepumpe 6-stufig ausgeführt ist, ist nur eine Grundwasserpumpe vorhanden. Damit ist der Anteil der Stromaufnahme der Grundwasserpumpe bei Teillast unnötig hoch. Hier beträgt die notwendige Förderhöhe rund 41 m (Druckverlust im Verdampfer 58 kPa) bei 49 m³/h Wassermenge. Die hydraulische Leistung liegt somit bei rund 5.6 kW und die elektrische Leistungsaufnahme bei 11.2 kW. Nach unseren Schätzungen verbraucht die Grundwasserpumpe etwa 11 % der Kompressorstromaufnahme pro Saison allein für die Wärmepumpen (das Quellenwasser wird noch anderweitig verwendet).

Bei der Nutzung von Grundwasser als Wärmequelle treten die nachstehend aufgeführten Verluste auf:

- Elektrische Energieaufnahme der Grundwasserpumpe, abhängig von der Lage des Grundwasserspiegels
- Wenn Zwischenkreis vorhanden: Thermodynamische Verluste durch die Grädigkeit von Trennwärmetauschern und zusätzlicher Pumpenaufwand
- Bei leistungsgeregelten Wärmepumpen meist keine oder nur beschränkte Anpassung der Pumpenleistung an die Leistungsstufen möglich
- Bei kalter Verteilung der Quellenwärme an mehrere Wärmepumpen treten Synchronisationsprobleme auf. Grundwasserpumpen arbeiten länger als bei nur einer Wärmepumpe. Wegen längerer Leitungen auch höhere Druckverluste.

Abwasser

Anlagen mit Abwasserwärmenutzung stellen fast immer Sonderfälle mit speziellen Voraussetzungen dar.

Bei Anlage 4022 handelt es sich um eine Grossanlage mit Wärmegewinnung aus gereinigtem Abwasser und kalter Verteilung der Quellenwärme an 10 grössere angeschlossene Unterstationen/Wärmepumpen. Die angeschlossenen Wärmepumpen weisen zudem einen Höhenunterschied bis über 70 m zur ARA auf. Das kalte Wärmeverteilsystem war ursprünglich

offen, was enorme Pumpendrucke und Pumpenleistungen erforderte. Es musste später in ein geschlossenes System umgebaut werden. Damit reduzierten sich die Pumpenleistungen deutlich. Die kalte Wärmeverteilung umfasst zwei resp. drei hydraulische Kreise in Serie. Die Quellenwärme wird über einen grosszügig dimensionierten Wärmetauscher an den Sekundärkreislauf abgegeben (Wasser). Dieser Sekundärkreislauf versorgt den Grossteil der Wärmepumpen mit Quellenwärme. Ein Teil der angeschlossenen Heizanlagen wird bivalent betrieben. Um den statischen Druck im Sekundärnetz zu begrenzen, wurde für die am höchsten liegenden Wärmepumpen noch ein Tertiärkreislauf eingebaut. Wegen der nun doch dreistufigen Grädigkeit mussten gewisse Vorkehrungen gegen das Einfrieren des Tertiärkreises getätigt werden. Sobald die Temperatur im Tertiärnetz unter 8 °C fällt, wird dessen Temperatur mittels eines Heizkessels gestützt. Gemäss Angaben des planenden Ingenieurbüros tritt dieser Fall im Normalbetrieb jedoch nur selten auf. Während eines Messjahres wurden Primärkreistemperaturen (Vorlauf) von 7 bis 22 °C gemessen. Der Sekundärkreis lag etwa 2-3 K darunter.

Die kalte Verteilung der Quellenwärme ist an sich sinnvoll. Im vorliegenden Fall ist der ein bis zweifache Übergabe der Quellenwärme in Wärmetauschern mit thermodynamischen Verlusten gekoppelt. Wenn man von je 3 K Grädigkeit in den Wärmetauschern und der Faustregel, dass pro Kelvin Grädigkeit die JAZ um 2.5 % sinkt, ausgeht so wird im vorliegenden Fall die JAZ um 7.5 resp. 15 % reduziert. Wegen des ausgedehnten Quellenetzes treten auch grössere Pumpenstromverbräuche auf. Nach unseren Berechnungen liegen die hydraulischen Leistungen der drei Pumpen (3 hydraulische Kreise) bei 50 kW, was bei einem Pumpenwirkungsgrad von 70% einer elektrischen Leistung von 71 kW entspricht. Wenn mehrere Wärmepumpen am gleichen Quellenkreis hängen, kann davon ausgegangen werden, dass die Quellenpumpen während der ganzen Heizsaison von etwa 5000 h durchlaufen. Mit dieser Annahme kann der Stromverbrauch der Pumpen auf 355'000 kWh geschätzt werden. Gemessen wurden 310'000 kWh bei 1.72 Mio kWh produzierter Heizwärme und 803'000 kWh verbrauchter elektrischer Energie, davon nur 502'000 für die Kompressoren. Der Pumpenaufwand betrug also 36 % des Gesamtstromverbrauchs oder 60 % des Kompressorstromverbrauchs.

Da Abwasserreinigungsanlagen naturgemäss am tiefsten Punkt eines Abwassernetzes liegen, ergeben sich im Normalfall grössere Distanzen und gewisse Höhenunterschiede zu den Verbrauchern. Dies ist ein prinzipieller Nachteil solcher Anlagen, der zu grossen Pumpenleistungen führt. Im Gegensatz dazu liegen Abwasserkanäle mit Schmutzwasser näher bei den Objekten.

Bei der Nutzung von gereinigtem oder ungereinigtem Abwasser als Wärmequelle treten nachstehende Verluste auf:

- Elektrische Energieaufnahme der Abwasserpumpe
- Bei gereinigtem Abwasser meist grössere Transportdistanzen und bei offenen Systemen auch geodätische Höhenunterschiede mit entsprechendem Pumpenaufwand
- Wenn Zwischenkreis vorhanden (bei Rohabwasser immer der Fall): Thermodynamische Verluste durch die Grädigkeit von Trennwärmetauschern und zusätzlicher Pumpenaufwand
- Bei kalter Verteilung der Quellenwärme an mehrere Wärmepumpen treten Synchronisationsprobleme auf. Abwasserpumpen arbeiten länger als bei nur einer Wärmepumpe. Wegen längerer Leitungen auch höhere Druckverluste.

Anlage 4032

Hier wird ebenfalls gereinigtes Abwasser verwendet. Die Temperaturen des Abwassers variieren je nach Jahreszeit von 6.3 bis 21.5 °C bei einem Mittelwert von 13.8 bis 14.5 °C. Die Verdampfungstemperatur liegt etwa 7.2 K unter der Vorlauftemperatur der Wärmequelle. Dies kann als normal angesehen werden. Wärmequellenseitig zeigt diese Anlage also keine Auffälligkeiten.

Anlage 4035

Diese Anlage arbeitet mit gereinigtem Abwasser aus einer nahe gelegenen ARA. Die Quellenwärme wird kalt an dezentrale Wärmepumpen verteilt. Für Heizung und Warmwasser bestehen jeweils getrennte Wärmepumpen.

Anlage 4036

Wasserzulauftemperatur variiert zwischen 12 °C im Winter und 24 °C im Sommer. Die Stromaufnahme der Grundwasserpumpe betrug in der Messperiode 20'846 kWh/a und der Stromverbrauch der Kompressoren 137'634 kWh/a (15.1%).

Anlage 4038

Bei dieser Anlage wird die Quellenwärme für die dreistufige Wärmepumpe aus einer 140 m entfernten ARA als gereinigtes Abwasser bezogen. Die Wassertemperatur variiert ebenfalls zwischen 12 und 24 °C. Bei einer Besichtigung vor Ort im Sommer dieses Jahres ist aufgefallen, dass die ARA-Pumpe in Betrieb war, obwohl keine einzige Wärmepumpe gearbeitet hat. Nach Rücksprache mit dem ARA-Betreiber kamen wir zum Schluss, dass diese Pumpe völlig unabhängig von den Wärmepumpen gesteuert wird. Der Stromverbrauch betrug in der Messperiode 19'383 kWh/a bei 119'904 kWh Stromverbrauch der Kompressoren. Dies sind 16.2%.

Sonderfälle

Unübliche Wärmequellen stehen bei den Anlagen 4026 und 4027 zur Verfügung.

Anlage 4026

Die WP-Anlage 4026 bezieht die Quellwärme aus Kühlwasser, das für die Lagerkühlung einer Grossmaschine eingesetzt wird.

Anlage 4027

Die Wärmepumpenanlage 4027 bezieht die Quellenwärme aus einem alpinen See (ca. 1830 m.ü.M). Dessen Wassertemperatur sinkt im Winter auf bis zu 3.6 °C. Seitens des Planers und des Herstellers der Wärmepumpe bestand die Befürchtung des Einfrierens des Verdampfers. Dies hat sich bis heute nicht bestätigt. Versuche im Herstellerwerk haben ergeben, dass das Einfrieren erst bei etwa 2 °C Vorlauftemperatur eintritt (Verdampfung -4.0 °C). Die Temperaturspreizung betrug 2 K. Der Temperaturschutz konnte dementsprechend eingestellt werden.

3.2 Unterstationen

Bei Anlagen mit vielen Objekten wird manchmal in den Unterstationen der Objekte ein Trennwärmetauscher einbaut, um den Hauptvorlauf vom Objektkreislauf zu trennen. Das hat den Vorteil, dass bei Reparaturen im Objektkreislauf, wo u.U. der Kreislauf geöffnet werden muss, der Hauptkreis nicht betroffen ist. Damit kann etwa das Entlüften nach Wiederinbetriebnahme des Objektkreises vereinfacht werden.

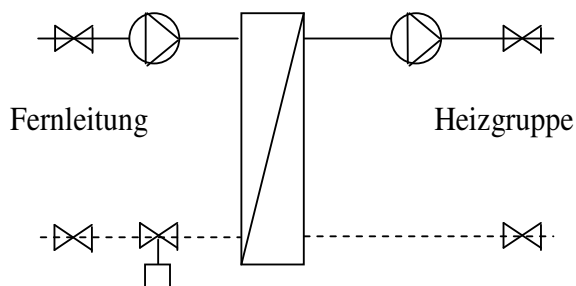


Abb. 8: Unterstation mit Netztrennung durch Wärmetauscher

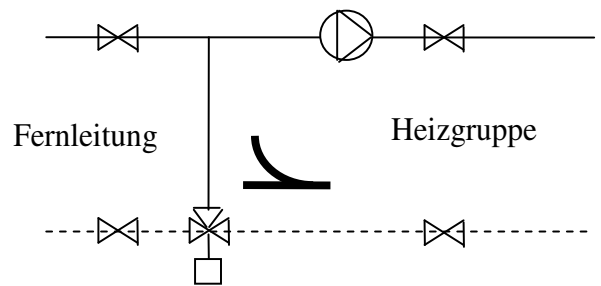


Abb. 9: Unterstation ohne Netztrennung

Der Nachteil eines Trennwärmetauschers liegt in dessen Grädigkeit. Man muss mit rund 3 K Temperaturabstand zwischen Hauptkreis und Objektkreis rechnen. Nach unserer Faustregel entspricht dies einer Verminderung der JAZ von 7.5 %.

3.3 Bivalente Anlagen mit Wärmepumpen

4020, 4022 (teilweise), 4024 (Holz und Oel), 4031, 4032 (Gas)

Bei bivalenten Anlagen mit Grosswärmepumpen wird jeweils ein Teil der Wärmerzeugung mit einem zweiten System, wie Öl- oder Gasheizkessel bewerkstelligt. Dadurch kann die Wärmepumpenleistung entsprechend gesenkt werden. Der Anteil der Energieproduktion, der meist fossilen Spitzenlastabdeckung, sollte dabei nicht allzu gross sein. Eine gute Kombination der Leistungsabdeckung kann bei bivalent-parallelem Betrieb mit einer Aufteilung von je 50% Leistungsanteil erreicht werden. Dieses Thema wurde bereits im Bericht „Grosswärmepumpen Phase 1“ detailliert behandelt.

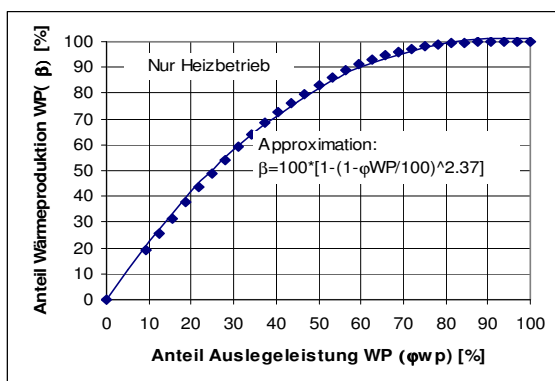


Abb. 10: Zusammenhang zwischen Modalsplit und Anteil Wärmeproduktion Wärmepumpe

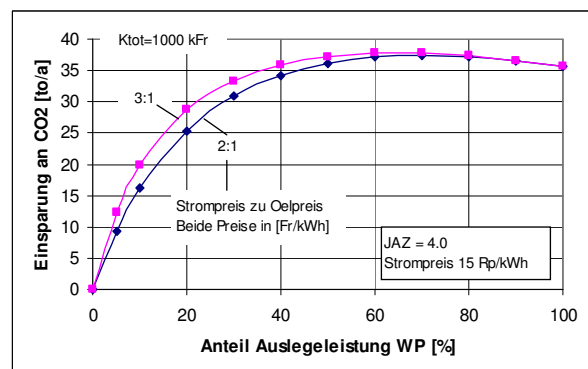


Abb. 11: Verlauf der CO₂-Einsparung in Abhängigkeit vom Leistungsanteil der Wärmepumpe

Trotz eines tiefen Wertes für den Auslegeleistungsanteil der Wärmepumpe ist der Anteil der Wärmeproduktion pro Heizsaison hoch. Man erkennt aus Abb. 39, dass der Anteil der Wärmeproduktion bei 50 % Modalsplit rund 80 % beträgt, sofern die Anlage richtig konzipiert ist.

Mit solchen Lösungen kann trotz sehr hohem Energieanteil aus erneuerbarer Energie (erwähntes Bsp. 80%) die Anlagenkonzeption bedeutend Kosten günstiger erfolgen. Die hydraulische Einbindung muss jedoch richtig sein.

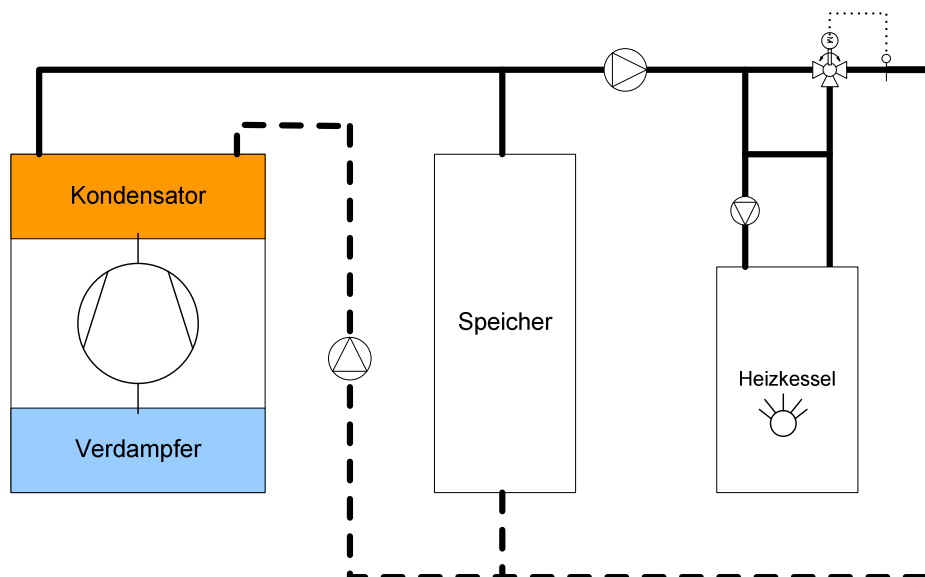


Abb. 12: Hydraulische Einbindung einer Heizkesselanlage mit Wärmepumpe

Die Wärmepumpe arbeitet auf den Speicher und der Heizkessel wird nur für die Nachwärmung des Vorlaufs eingesetzt. Dabei muss ein Heizkessel eingebaut werden der auf einer minimalen Leistung von ca. 10 % noch störungsfrei arbeitet.

Bei einem Heizkessel, der nicht modulierend betrieben werden kann, muss der Heizkessel mit einem genügend grossen Speicher hydraulisch eingebunden werden, sodass der Heizkessel diesen Speicher aufladen kann. Dabei ist der Speicherinhalt so zu planen, dass auch im Minimalteillastbereich eine Laufzeit von min. ca. 20-30 Minuten gewährleistet ist. Die Einbindung der Speicheranlage ans Verteilnetz erfolgt dann analog der Kesseleinbindung mit variabler Leistung mit einem Dreiwegventil in der Hauptleitung, das nur soviel Wasser aus dem Speicher holt, wie es für die Einhaltung der Vorlauftemperatur gemäss Heizgesetz benötigt.

Bei bivalenten Anlagen besteht immer die Gefahr, dass die Rücklauftemperaturen zu hoch liegen, womit sich die Wärmepumpe aus Gründen des Maschinenschutzes abschaltet und die ganze Wärmeproduktion dem Heizkessel überlässt. Anlage 4031 ist ein Beispiel, wo dies recht gut gelöst ist. In diesem Fall werden Verbrauchergruppen mit sehr unterschiedlichen Vorlaufregimen gespeist. Der Wärmeanteil der beiden Verbraucher mit 80 °C Auslegevorlauf beansprucht zusammen jedoch nur etwa 16% der Gesamtwärme. Damit dürfte der Rücklauf vor allem durch die Rücklauftemperaturen der anderen, mit niedrigeren Temperaturen arbeitenden Gruppen dominiert werden. Die Rücklauftemperaturen bewegen sich also in einem Bereich, bei dem die Wärmepumpe auch am kältesten Tag noch arbeiten kann. Allerdings muss dann der Heizkessel die Temperaturerhöhung auf die grösste verlangte Vorlauftemperatur vornehmen, was mit einem erklecklichen Wärmeanteil erkauft wird. Der Anteil der Wärmepumpe sinkt somit.

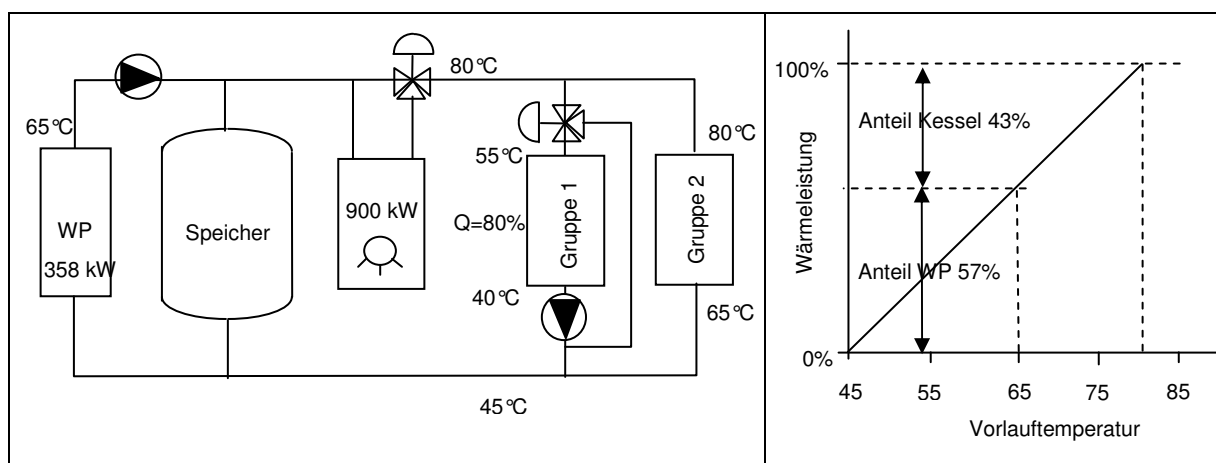


Abb. 13: Wärmeanteile von Kessel und Wärmepumpe (Beispiel)

Es wird unterstellt, dass der Temperaturhub der Wärmepumpe geregelt werden kann und bis zu 16 K beträgt. Bei ungeregeltem Temperaturhub von 10 K ändern sich die Verhältnisse zu ungunsten der Wärmepumpe. In diesem Fall beträgt der Leistungsanteil der Wärmepumpe im Auslegungspunkt nur 29 %. Bei einer Vorlauftemperatur von 60 °C und einer Rücklauftemperatur von 31.5 °C betragen die Leistungsanteile der Wärmepumpe 100 % resp. 35% bei nur 10 K Hub. Hier zeigt es sich klar, dass eine Mengensteuerung des Senkenmassenstroms im Kondensator den Anteil der Wärmepumpe deutlich erhöhen kann. Die effektiv gemessenen Wärmeproduktionsanteile der Wärmepumpe liegen je nach Jahr zwischen 28 und 49 %. Bei hohen Leistungsanforderungen kann der Leistungsanteil der Wärmepumpe zusätzlich durch die maximale Wärmeabgabe der Wärmepumpe beschränkt sein (358 kW von total 1258 kW = 28%).

3.4 Warmwasserversorgung

Von den untersuchten 14 Anlagen haben 10 eine zentrale Warmwasserversorgung. Das bedeutet, dass mehrere Objekte an der gleichen zentralen Heizzentrale hängen. Unsere Betrachtung erfolgt getrennt nach Heizung und Warmwasser. Wärmeverluste im Nahwärmenetz fallen im Sommer nur dann an, wenn die Warmwasserversorgung zentral erfolgt. Die Wärmeverluste im Nahwärmenetz für die Heizsaison werden in Kap. 3.5 behandelt.

Tab. 6: Anlagen mit Warmwasserversorgung (Topologien siehe Abb. 14 bis 17)

Anlage	Topologie	Volumen Warmwasserspeicher [dm ³]	Volumen Nahwärmenetz [dm ³]	Volumen Heizungsspeicher [dm ³]
4020	A	20'500	unbekannt	10'000
4022	diverse	diverse	diverse	diverse
4023	A	18'800	1'454	7'200
4024	C	2'000	unbekannt	4'000
4025	A		1'480	2'800
4026	keine		0	18'000
4027	keine		0	4'800
4029	separat		0	6'000
4030	C	2'000	1'178	9'000
4031	A	4'000	4'466	14'000
4032	C	2'400	unbekannt	unbekannt
4035	Dezentrale Erzeugung	Nicht bekannt	0	Nicht bekannt
4036	A	16'000	1'287	7'200
4038	B2	8'000	495	2'000

In den analysierten Gross-Wärmepumpenanlagen haben wir folgende Topologien der Warmwasseraufbereitung gefunden:

- a) Zentrale Wärmeenergie mit dezentralen Warmwasserspeichern
Dieses Konzept findet sich bei den Anlagen 4020 (ursprünglich¹¹), 4023, 4025, 4031, 4036. Die zentrale Wärmepumpe lädt sommers wie winters die dezentralen Warmwasserspeicher.

Der Nachteil dieses Konzepts zeigt sich vorwiegend im Sommerbetrieb, wenn also keine Heizwärme benötigt wird. Zur Aufladung der dezentralen Warmwasserspeicher muss das Nahwärmenetz auf die Endtemperatur der Warmwasserspeicher hochgefahren werden. Nach dem Aufladen der Speicher kühlt sich das Nahwärmenetz wieder aus. Das Nahwärmenetz beinhaltet ein recht grosses Wasservolumen.

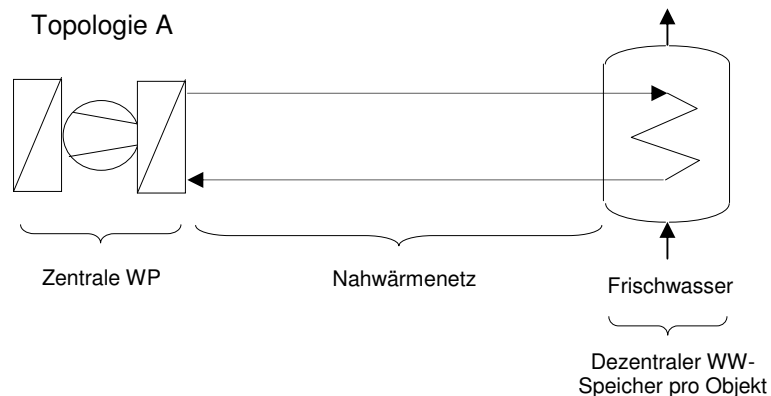


Abb. 14: Zentrale Wärmeenergie mit dezentralen Warmwasserspeichern

¹¹ Gemäss einer mündlichen Mitteilung des Planers waren die Aufladezeit und die Wärmeverluste der dezentralen WW-Speicher derart gross, dass diese auf Elektroregister umgebaut wurden.

Die beim Abkühlen an die Umgebung abgegebene Wärme ist verloren. Wenn jedes Objekt individuell eine Nachladung verlangt, so wird das Nahwärmenetz u.U. mehrmals pro Tag hochgefahren und abgekühlt. Das kann vermieden oder zumindest gemildert werden, wenn prioritär eine Nachtauladung für alle Speicher und grosszügig dimensionierte Speicher, deren Inhalt im Normalfall für den Tagesbedarf reicht, vorgesehen werden. Wenn trotzdem eine Nachladung über Tag erfolgen muss, so sollten alle Speicher zwangsweise mit aufgeladen werden.

Es besteht eine weitere grundlegende Frage. Wenn mehrere Speicher parallel geladen werden, so erreichen sie die Ladetemperatur i.a. nicht gleichzeitig. Sobald ein Speicher geladen ist, wird er hydraulisch abgetrennt und die Wärmepumpenleistung verteilt sich auf die noch nicht geladenen Speicher. Dadurch vergrössert sich tendenziell die Temperaturspreizung von Vor- und Rücklauf. Mit einer variablen UP kann der Temperaturhub gesteuert resp. von einer Überhöhung abgehalten werden. Bei mehrstufigen Wärmepumpen sollte zudem die Zahl der aktiven Stufen entsprechend reduziert werden, um eine Leistungsanpassung zu erreichen. Vor allem wenn noch ein Heizungsspeicher vorhanden ist, muss aufgepasst werden, dass dieser nicht zusätzlich geladen wird.

b) Brauchwarmwasser mit dezentraler WW-Wärmepumpe

Bei diesem Konzept benutzen die dezentralen Wärmepumpen den Hauptvorlauf der zentralen Heizwärmepumpe als Wärmequelle. Kältetechnisch ist dies eine kaskadierte, zweistufige Wärmepumpe. Entgegen landläufiger Meinung führt dies nicht zu hohen Leistungszahlen. Für die Wärmeerzeugung arbeiten eben zwei Kompressoren in Serie, die beide Strom beziehen.

Man kennt zwei Ausführungen. Bei Ausführung B1 arbeiten beide Wärmepumpen auch im Sommerbetrieb. Dieser Fall führt im Sommerbetrieb zu speziell tiefen Leistungs- und Arbeitszahlen. Ein solcher Fall wurde in [1] behandelt. Dieser Fall ist im untersuchten Sample nicht vorhanden:

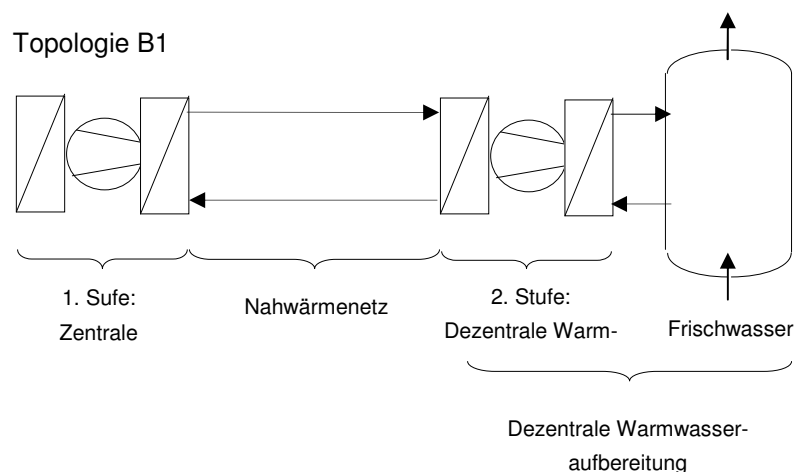


Abb. 15: Warmwassererzeugung mit dezentraler Wärmepumpe

Konzept der Warmwasseraufbereitung mittels zweistufiger Kaskade und Nutzung des Hauptvorlaufs als Wärmequelle für die Warmwasser-Wärmepumpen im Winter- und Sommerbetrieb (Topologie B1).

Bei Ausführung B2 wird der Hauptvorlauf im Sommer über einen Wärmetauscher direkt von der Wärmequelle beaufschlagt. Die zentrale Heizwärmepumpe wird also umgangen. Dieser Fall ist im Sommerbetrieb günstiger als im Fall A. Beim Nachladen muss das Nahwärmenetz nicht auf die Endtemperatur des Ladevorganges hochgefahren werden, sondern bleibt kalt. Einzig die Umwälzpumpen-Energie des Nahwärmenetzes fällt ins Gewicht. Eine solche Anordnung findet man bei Anlage 4038:

Oft ist die Auslegeleistung des Warmwasserbedarfs deutlich geringer als die der Heizung. Im Sommerbetrieb sollten die Quellenpumpen entsprechend angepasst werden können, d.h. die Anzahl aktiver Wärmepumpen proportional zur Anzahl ladebereiter Speicher gefahren werden.

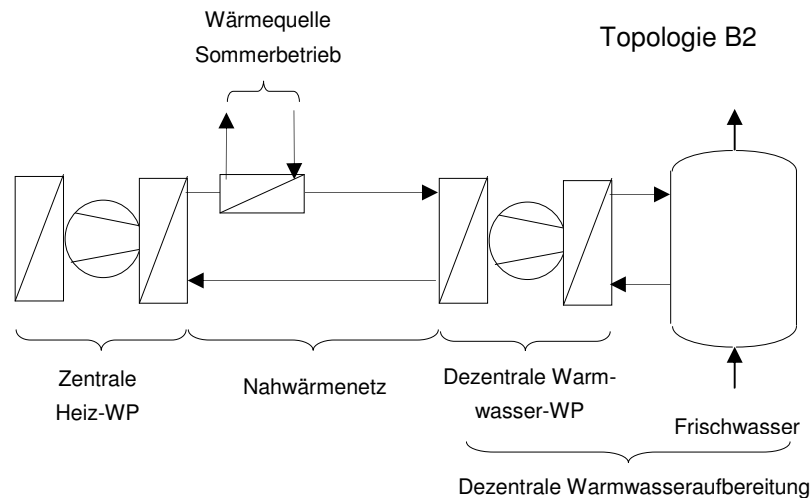


Abb. 16: Zweistufige Kaskade und Nutzung des Hauptvorlaufs als Wärmequelle für die Warmwasser-Wärmepumpen mit Sommereinspeisung im Hauptvorlauf

c) WP und Speicher zentral

Dieses Konzept ist hydraulisch einfach und vermutlich billiger als die andern hier besprochenen Beispiele. Es ist bei den Anlagen 4024, 4030 und 4032 eingebaut. Hingegen sind die Wärmeverluste im Grobverteilnetz des Warmwassers gross, da die Warmwasserleitungen dauernd auf Warmwasserniveau gehalten werden müssen, sei es mittels Zirkulation oder Begleitheizung.

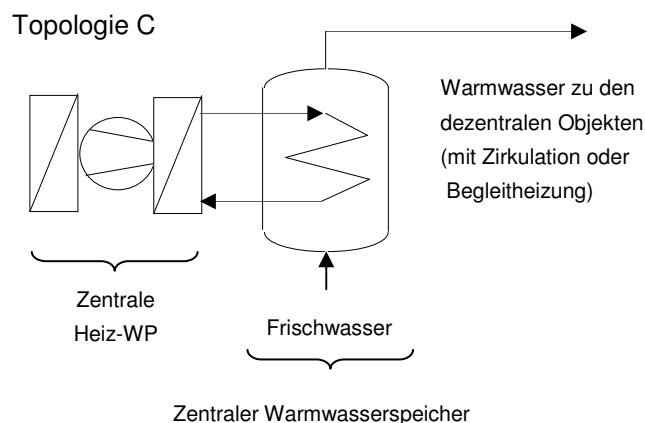


Abb. 17: Zentrale Wärmepumpe und zentraler Warmwasserspeicher. Warmwasserverteilung an die Objekte mittels Zirkulation und Begleitheizung.

d) dezentrale Heiz-WP mit kalter Wärmequellenverteilung (4035)

Bei dezentralen Heizwärmepumpen und kalter Verteilung der Quellenwärme erfolgt die Warmwassererzeugung nahe liegender weise ebenfalls dezentral, wobei üblicherweise die Heizwärmepumpen für beide Zwecke herangezogen werden. Anlage 4035 entspricht diesem Fall. In einem solchen Fall ist die Jahresarbeitszahl der Warmwasseraufbereitung i.a. gut.

Bei zentraler Wärmeerzeugung mit dezentralen Warmwasserspeichern (Topologie A) für mehrere Objekte muss die Nutzwärme via ein Nahwärmenetz verteilt werden. Dadurch entstehen zusätzliche Verluste, die bei einer Ein-Objekt-Heizanlage nicht auftreten.

- Wärmeverluste an die Umgebung im Sommer. Erhöhte Wärmeverluste im Winter
- Elektrischer Pumpenaufwand
- Aufheizen des Nahwärmenetzes im Sommerbetrieb
- Temperaturabnahme längs Transportleitung -> Anhebung der Vorlauftemperaturen
- Fehlende Synchronisation der Ladezeiten der externen Speicher verlängert die Laufzeiten

Alternativ steht der Warmwasserspeicher in der Heizzentrale und das Warmwasser wird über ein Warmwassernetz an die Objekte verteilt (Topologie D). Hier entstehen die Verluste im Warmwasserverteilsystem:

- Zirkulationssystem: Pumpenaufwand und Wärmeverluste der stets auf Gebrauchstemperatur gehaltenen Zirkulation (oft mit Nachtabstaltung der Zirkulation, dafür Wiedererwärmung nach dem Einschalten)
- Begleitheizung: Wärmeverluste gegenüber Zirkulation etwa halbiert (Widerstandheizung).
- Zirkulationssysteme mit separater Wärmepumpe zur Deckung der Zirkulationsverluste. Energetisch ähnlich wie erste Variante.

3.5 Nahwärmenetze (zentrale oder dezentrale Wärmeerzeugung)

Von den untersuchten 14 Anlagen haben 10 ein Nahwärmenetz. Das bedeutet, dass mehrere Objekte an der gleichen zentralen Heizzentrale hängen. Unsere Betrachtung erfolgt getrennt nach Heizung und Warmwasser. Wärmeverluste im Nahwärmenetz fallen im Sommer nur dann an, wenn die Warmwasserversorgung zentral erfolgt. Die Wärmeverluste im Nahwärmenetz für die Warmwasserversorgung wurden in Kap. 3.4 abgehandelt.

Tab. 7: Übersicht zur Wärmeversorgung

Anlage	Nahwärmenetz	Trennwärmetauscher	JAZ WP	JAZ Anlage
4020	Ja	nein	3.42	3.02 ¹²
4022	teilweise	Ja		
4023	Ja	Ja	3.56	2.61
4024	Ja	Ja	3.42	2.14
4025	Ja	nein	3.32	2.26
4026	nein	nein	4.33	2.28
4027	nein	nein	4.52	3.47
4029	nein	nein	4.76	3.81 ¹³
4030	Ja	nein	2.33	2.07
4031	Ja	nein	2.68	2.30
4032	Ja	nein	2.66	1.88
4035	nein	nein	4.17	3.88
4036	Ja	nein	3.29	2.67
4038	Ja	nein	4.83	3.45

Nahwärmenetze haben Wärmeverluste ans umgebende Erdreich und benötigen elektrische Energie für die Umwälzpumpen. Durch die Wärmeverluste sinkt die Vorlauftemperatur bis zu den Unterstationen, weshalb die Vorlauftemperatur an der Wärmepumpe entsprechend angehoben werden muss. Dieser Effekt ist allerdings gering. Falls in den Unterstationen

¹² Die Nahwärmeverluste konnten nicht bestimmt werden. Daher ist die JAZ Anlage effektiv geringer.

¹³ Minderung der JAZ wird durch Quellenanlage bewirkt. Kein Nahwärmenetz.

Trennwärmetauscher eingebaut sind, muss die Vorlauftemperatur an der Wärmepumpe um die Grädigkeit der Wärmetauscher höher gefahren werden. Alle vier Elemente reduzieren die Jahresarbeitszahl. Dies deutet bereits Tabelle 7 an.

Anlage 4031

Diese Anlage hat ein relativ ausgedehntes Nahwärmenetz mit hohen Vorlauftemperaturen bis 80 °C.

3.6 Betriebsregime (Heizgesetz, etc.)

Jede Anlage sollte mit einem möglichst gut an die Bedürfnisse des Objekts und deren Betriebsanforderungen angepassten Betriebsregime laufen. Dabei sind sowohl die regeltechnischen Anforderungen (frei programmierbares System oder einfache handelsübliche Regulierung), wie auch die Bedienerfreundlichkeit entscheidend wichtig. Es nützt das beste und neueste Softwaresystem nichts, wenn das Bedienungspersonal vollkommen überfordert ist. Die Anlage wird innert wenigen Monaten nach deren Fertigstellung und Einjustierung dem Betriebspersonal übergeben und die Verantwortung dorthin weiterdelegiert.

Die Optimierung während der ersten paar Monate ist ein eminent wichtiger Vorgang. Als Beispiel soll hier die Betriebstemperatur der Nahwärmeschiene betrachtet werden. Diese Temperatur muss gewährleisten, dass der ungünstigst gelegene Wärmebezüger noch zufrieden gestellt werden kann. Bei der Inbetriebnahme wird nun, um keine nachteiligen Erfahrungen zu machen, die Wärmeschiene mit einer, je nach Sicherheitsdenken und Laune, mehr oder weniger überhöhten Temperatur gefahren. Dabei wirken sich für die Wärmeproduktion einige technisch/physikalische Bereiche negativ aus, wie höhere Wärmeverluste und schlechtere Effizienz der Wärmepumpe wegen höherer Senktemperatur. Wenn auf der Wärmeschiene anfänglich überhöhte Temperaturen gefahren werden, muss man diese suggestiv wieder senken, bis die für den Betrieb richtige Temperatur erreicht wird.

Es gibt nicht wenige Anlagen, wo aus nicht nachvollziehbaren Gründen diese Heiztemperaturen deutlich überhöht gefahren werden und das während der gesamten Heizsaison.

Bei Objekten, die in den vergangenen 10 Jahren erstellt worden sind, findet man durchwegs sehr niedertemperaturige Heizgesetze. Sie bewegen sich zwischen 35 °C und 45 °C im Auslegungspunkt. Bei Sanierungen von älteren Bauten liegen die Systemtemperaturen naturgemäss höher und führen zu entsprechend niedrigen Jahresarbeitszahlen. Wir haben Vorlaufregime bis zu 80 °C angetroffen.

Bei Sanierungen zeigt sich die Notwendigkeit einer vorangehenden energetischen Sanierung der Bauhülle deutlich. Dies senkt nicht nur den Wärmebedarf, sondern auch die notwendigen Systemtemperaturen. Wo dies aus irgendwelchen Gründen nicht machbar ist, sollten dezentrale Wärmepumpen verwendet werden, deren Systemtemperaturen eben den unterschiedlichen Bedürfnissen der Gebäude angepasst werden können.

Wichtig ist auch die Vermeidung von Trennwärmetauschern. Von Planerseite wird dazu manchmal argumentiert, dass vor allem bei etappenweise erstellten Überbauungen beim Zubau einer weiteren Etappe nicht jedes Mal der ganze Heizungskreislauf entleert, gefüllt und entlüftet werden muss. Man muss aus energetischer Sicht einfach beachten, dass jeder Trennwärmetauscher die Jahresarbeitszahlen um etwa 7.5 bis 10 % reduziert.

3.7 Kosten (Investitionen)

Erstaunlicherweise war es fast nicht möglich an die Investitionskosten heranzukommen. In den meisten Fällen waren die Kosten in der benötigten Transparenz gar nicht verfügbar. Dort wo die Investitionen bekannt sein müssen, nämlich bei den Contractorfirmen, wurden diese aus Gründen der Geheimhaltung (eigenes Know how) nicht offen gelegt.

Bei den von Eigentümern selbst erstellten Wärmepumpenanlagen sind diese Investitionskosten nicht bei den für den Anlagenbetrieb zuständigen Abteilungen oder Personen verfügbar. Dies ist zumindest für den Unterhalt von Anlagen nachteilig, da oft nicht mal die Planungs- und Installationsfirmen bekannt sind.

Unser ursprüngliches Ziel war es, Kostenkennzahlen als Richtwerte für die Beurteilung von Offerten für geplante Anlagen und die Wahl der Heizungskonzepte zu eruieren. Wir mussten feststellen, dass die Bauherren meist über keine Abrechnungen ihrer Heizanlagen verfügen.

Es sind nur gerade fünf Anlagen, die wir bezüglich der Kosten analysieren konnten (Anlagen 4020, 4022, 4035, 4036 und 4038).

Tab. 8: Spezifische Kosten der Wärmeerzeugung

Anlage	Quelle	Investition Gesamtanlage Wärmeleistung [Fr/kWth]	Investition Quelle Wärme- leistung [Fr/kWth]	Wärmepreis Gesamtanlage Nutzwärme (ohne Kapitaldienst) [Rp/kWth]	Wärmepreis Anteil Quelle Nutzwärme [Rp/kWth]
4020	EWS	3'884	2'550	7.51	
4022	Abwasser, gereinigt		1'712		5.70
4035	Abwasser, gereinigt	2'092	1'024		
4036	Grundwasser			6.47	
4038	Abwasser, gereinigt	2'937	1'772	10.10	

Wir haben darauf verzichtet, den Kapitalanteil in den Wärmepreis einzurechnen, da dessen Anteil von der Amortisationsdauer und den Zinssätzen abhängig ist. Dort, wo die Investitionskosten angegeben sind, kann man dies nach Massgabe eigener Annahmen nachholen.

4. Schlussfolgerungen

Die Erfahrung lehrt, dass die Jahresarbeitszahlen (JAZ) von Grosswärmepumpen meist deutlich unter den Werten von Kleinwärmepumpen liegen. Dies hat das BFE veranlasst, bei ausgeführten Grosswärmepumpen nach den Gründen für dieses Phänomen zu suchen. Es wurde in zwei Phasen insgesamt 24 solcher Wärmepumpenanlagen detailliert analysiert. Das Ziel der Untersuchung besteht darin, konzeptionelle Fehler zu erkennen und Planungsgrundlagen zu schaffen, um zukünftige Anlagen energetisch besser zu konzipieren, sprich höhere JAZ zu erreichen. Gleichzeitig sollten auch wirtschaftliche Kennzahlen ermittelt werden, um Referenzwerte für die Grobbeurteilung der Kosten von Neuanlagen zu erhalten. Die Untersuchungen wurden, soweit möglich, getrennt nach Heizwärme und Warmwasser aufgeteilt.

Bereits in der ersten Projektphase (Grosswärmepumpen 1) hat sich gezeigt, dass die früher erstellten Vergleiche von Jahresarbeitszahlen von Gross-Wärmepumpen aus P+D-Projekten und der FAWA-Studie für Kleinwärmepumpen, die für die Grosswärmepumpen deutlich schlechtere JAZ-Werte ergaben, in Wirklichkeit auch stimmen. Nun können wir in dieser zweiten Projektphase diese Aussage bestätigen. Werden mehrere Objekte durch eine zent-

rale Wärmepumpe versorgt, so ergeben sich aus dem Fernleitungsnetz (den Verbindungsleitungen zwischen Heizzentrale und Satellitengebäuden) zusätzliche Verluste, die bei Kleinwärmepumpen nicht auftreten. Es sind dies zusammengefasst nachstehende Hauptpositionen:

- Wärmeverluste der Fernleitungen, die an die Umgebung gehen.
- Transportenergie in den Fernleitungen (Massenstrom)
- Grädigkeit von Trennwärmetauschern -> thermodynamische JAZ-Reduktion, die Kondensationstemperatur muss angehoben werden, was die Leistungszahl verschlechtert.
- Die Wärmeverluste im Leitungsnetz, Temperaturabnahme längs Transportleitung -> Anhebung der Vorlauftemperatur

Diese Zusatzverluste, die nur bei Fernleitungsnetzen entstehen, führen zu einer deutlichen Verminderung der Jahresarbeitszahlen in der Grössenordnung von etwa 0.40.

Weiter beeinflussen auch die Wärmequellenanlagen die Jahresarbeitszahlen und drücken diese bei schlechten Verhältnissen deutlich nach unten. Mit der Auslegung von Wärmequellenanlagen kann auch der Temperaturabstand zwischen der Quelleneintrittstemperatur und der Verdampfungstemperatur beeinflusst werden. Man erinnere sich: mit jedem Kelvin höherer Verdampfungstemperatur steigt die Jahresarbeitszahl um etwa 2.5 %.

Konzeptionelle Fehler erhöhen die Verminderung der Jahresarbeitszahlen zusätzlich. Dies gilt insbesondere für die Brauchwarmwasserversorgung. Hier kommt als Besonderheit hinzu, dass nicht kontinuierlich Wärme verlangt wird. Durch das periodische Aufladen des Brauchwarmwasserspeichers und der Fernleitungen kühlen sich diese aus und müssen beim erneuten Aufladen erst wieder hochgefahren werden.

Dabei wurde das oben genannte Phänomen der niedrigen JAZ bestätigt. Es wurden folgende Jahresarbeitszahlen für Heizung und Warmwasser ermittelt:

Tab. 9: Gemessene Jahresarbeitszahlen von Grosswärmepumpen

1. Serie

	Wärmequelle	Nennleistung	JAZ Anlage
Nr.		WP	effektiv
		[kWth]	<i>Planung</i>
A	Grundwasser	760	3.20
B	Grundwasser	168	3.15
C	gereinigtes Abwasser	540	3.60
D	Seewasser	134	3.00
E	ungereinigtes Abwasser	450	2.47
F	gereinigtes Abwasser	280	2.47
G	Erdwärmesonden	92	3.50
H	Ungereinigtes Abwasser	260	3.00
I	Erdwärmesonde	519	3.71
K	Erdwärmesonden	140	3.42
L	gereinigtes Abwasser	380	3.41
M	gereinigtes Abwasser	2400	2.63
N	Erdwärmesonde	340	3.30
	<i>Minimum</i>	<i>92</i>	<i>2.47</i>
	<i>Mittelwert</i>	<i>517</i>	<i>3.16</i>
	<i>Maximum</i>	<i>2400</i>	<i>3.71</i>

2. Serie

		Nennleistung [kW]	JAZ Anlage
4020	Erdwärmesonden	240	3.02
4022	Abwasser, gereinigt	1711	2.14
4023	Quellwasser	244	2.61
4024	Erdwärmesonde/Luft	130	2.54
4025	Grundwasser	275	2.26
4026	Kühlwasser	165	4.33
4027	Seewasser	150	3.47
4029	Grundwasser	218	3.81
4030	Grundwasser	345	2.07
4031	Grundwasser	264	2.30
4032	Schmutzwasser	446	1.88
4035	Abwasser, gereinigt	806	3.88 ¹⁴
4036	Grundwasser	350	2.67
4038	Abwasser, gereinigt	130	3.45
	<i>Minimum</i>	<i>130</i>	<i>1.88</i>
	<i>Mittelwert</i>	<i>391</i>	<i>2.89</i>
	<i>Maximum</i>	<i>1711</i>	<i>4.33</i>

Eine Übersichtsdarstellung der JAZ-Werte der 2. Serie zeigt deutlich die Überlegenheit von dezentralen Heizanlagen:

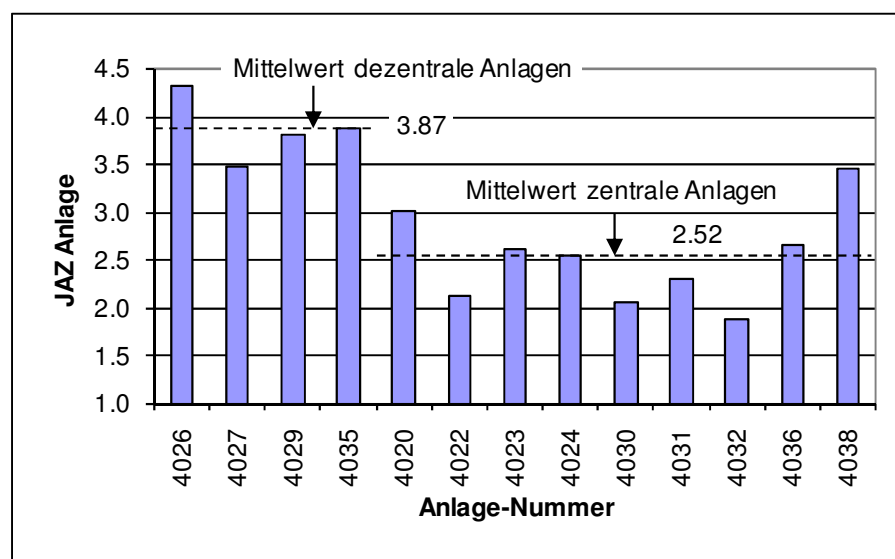


Abb. 18: Übersichtsdarstellung der Anlage-Jahresarbeitszahlen

Es war, wie schon bei der ersten Serie, teilweise sehr schwierig, an die notwendigen Unterlagen heranzukommen. Die Bereitschaft zur Herausgabe von Unterlagen war sehr unterschiedlich und reichte von unproblematisch bis zur Abschottung. Was uns auch erstaunt hat, war die meist sehr unvollständige Bestückung mit Unterlagen bei der Bauherrschaft. In einem Fall war es selbst der Bauherrschaft unmöglich, dem planenden Ingenieurbüro die fehlenden Unterlagen „auszureissen“. Diese Anlagen mussten wir dann wohl oder übel von der Liste streichen, resp. die bereits getätigten Vorarbeiten abschreiben.

¹⁴ Wärmebedarfsgemittelter Wert von drei Heizzentralen

5. Zusammenfassung der Erkenntnisse

Die Hauptzielsetzung dieser Forschungsarbeit hat keinen Anspruch auf Vollkommenheit. Viel mehr wollte man durch die Analyse von ausgeführten Grosswärmepumpen auf grundsätzliche konzeptionelle speziell gute Lösungen aber auch Schwachpunkte stossen. Durch diese Erfahrungen soll es möglich werden, dem Planer bessere Beurteilungsmöglichkeiten und empfehlenswerte Konzepte aufzuzeigen und wenn möglich entsprechende Unterlagen zu schaffen und zur Verfügung zu stellen. Letztlich sollen die Energieeffizienz erhöht und die Investitions- und Betriebskosten reduziert werden.

Die Erkenntnisse aus den untersuchten Anlagen lassen sich in wenige Sätze fassen. Grundsätzlich muss man sich im Klaren sein, dass jedes Kelvin höhere Senktemperatur resp. niedrigere Quelltemperatur die Leistungs- und die Arbeitszahl um 3 % senkt¹⁵ und umkehrt.

1. Zentrale Wärmeversorgungen von mehreren Objekten haben energetisch verschiedene Nachteile. Das benötigte Nahwärmenetz hat Wärme- und Pumpenverluste. Meistens werden die Hausnetze in den Unterstationen durch Trenn-Wärmetauscher vom Nahwärmenetz entkoppelt. Die Grädigkeit¹⁶ dieser Trenn-Wärmetauscher senkt die JAZ um mindestens 9 %.
2. Die Temperatur der Wärmeverteilschiene muss stets so hoch gehalten werden, wie es das höchste Heizgesetz aller Objekte erfordert. Die Wärmeverluste entlang des Nahwärmenetzes verursachen auch eine Abnahme der Wassertemperatur bis zur Unterstation. Dies muss durch eine entsprechende Erhöhung der Vorlauftemperatur ab Kondensator kompensiert werden. Dadurch sinkt die Arbeitszahl um 2.5 % pro Kelvin höherer Vorlauftemperatur ab Kondensator.

Die Wärmeversorgung von mehreren Objekten sollte aus energetischen Gründen mit *dezentralen* Wärmepumpen erfolgen, d.h. mit je einer Wärmepumpe pro Objekt. Damit können die Verluste der Nahwärmenetze und (sofern vorgesehen) die Grädigkeit von Trenn-Wärmetauschern in den Unterstationen vermieden werden. Zudem kann das Heizgesetz individuell den Erfordernissen jedes Objekts angepasst werden.

3. Bei kollektiven Wärmequellen (Grundwasser, Oberflächenwasser, Abwasser) ist das Konzept der kalten Verteilung der Quellenwärme mit dezentralen Wärmepumpen energetisch besser als eine zentrale Wärmepumpe mit Nahwärmenetz. Es ist wichtig, dass die Leistung der Grundwasserpumpe der Anzahl aktiver Wärmepumpen angepasst wird.
4. Bei solchen offenen Anlagen spielt die Wasserchemie für den Wartungsaufwand eine grössere Rolle. Wärmetauscherflächen werden je nach Situation mit einem Biofilm bedeckt, der den Wärmedurchgang reduziert. Ebenso können mechanische Verschmutzungen die Durchflussquerschnitte verengen. In allen diesen Fällen muss die Anlage periodisch gereinigt werden. Es gibt noch wenige Informationen über zuverlässige und kostengünstige Reinigungsverfahren. Auch die Kosten für die periodische Reinigung von solchen Wärmetauschern konnten nicht eruiert werden.
5. Die Warmwasserversorgung sollte ebenfalls dezentral pro Objekt erfolgen. Vor allem im Sommer bewirkt das Hochfahren des Nahwärmenetzes bei zentraler Wärmeversorgung grosse Energieverluste.
6. Warmwasser-Speicher mit innen liegendem Heizregister haben hohe Grädigkeiten. Es empfiehlt sich, einen aussen liegenden zwangsdurchströmten Wärmetauscher zu verwenden. Diese Lösung hat den weiteren Vorteil, dass für die Temperaturerhöhung wegen des Legionellenproblems die gesamte Speicheranlage geeigneter auf die verlangten ca. 60 °C hochgefahren werden kann.

¹⁵ Im Falle der Jahresarbeitszahl gilt diese Angabe für das Jahresmittel der Senken- resp. Quelltemperatur.

¹⁶ Wir verstehen unter Grädigkeit den mittleren Temperaturabstand zwischen den beiden Wärme austauschenden Medien.

7. Bivalente Anlagen müssen bivalent-parallel betrieben werden und hydraulisch so geplant sein, dass die zweite Wärmequelle (meistens ein Öl- oder Gasheizkessel) nur für die Deckung der fehlenden Spitzenlast eingesetzt wird. Dies bedingt vorallem, dass die Heizkesselanlage gleitend bis auf min. 10% Lastanteil heruntergefahren werden kann. Mit etwas zusätzlichem Aufwand kann jedoch auch eine ältere Kesselanlage richtig eingebunden und betrieben werden (siehe Kap.3.3 Bivalente Anlagen mit Wärmepumpen). Schlecht geplante und/oder nicht richtig einregulierte Anlagen tendieren dazu, dass infolge zu hoher Vorlauftemperaturen, resp. damit verbunden auch zu hoher Rücklauftemperaturen der Betrieb der Wärmepumpe drastisch eingeschränkt wird. Die Kondensations-temperatur der Wärmepumpe überschreitet so den zulässigen Wert und die Maschine wird über die Schutzvorrichtung abgeschaltet. Dieses Problem wird konzeptionell und planerisch offensichtlich noch nicht beherrscht, da die effektiven Rücklauftemperaturen zu wenig sorgfältig in die Planung einbezogen werden.
8. Generell ist den Nebenantrieben energetisch grosse Aufmerksamkeit zu zollen. Wenn etwa für mehrere Wärmepumpen oder Leistungsstufen nur eine Grundwasserpumpe vorhanden ist, so arbeitet diese zum grössten Teil unter erhöhten Leistungsanforderungen, d.h. sie arbeitet stets auf Volllast auch wenn nur ein Teil der Wärmepumpen oder Leistungsstufen aktiv sind.
9. Im Falle von dezentralen Warmwasserversorgungen empfiehlt es sich aus energetischen Gründen, „zeitliche Ladefenster“ vorzusehen, damit eine gewisse Synchronisation beim Betrieb der Grundwasserpumpen möglich ist. Dadurch lassen sich die Betriebsstunden und der Energieverbrauch der Grundwasserpumpen reduzieren.

Vorteile von zentralen Wärmepumpenanlagen

Die zentralen Wärmepumpenanlagen haben auch Vorteile. So dürften die Investitionskosten niedriger sein. Dies gilt vor allem für bivalente Anlagen. Auch die Wartungs- und Reparaturkosten dürften niedriger liegen. Zudem ist auch der Raumbedarf geringer.

Literatur

[1]	Hubacher Peter, Erb Markus, Ehrbar Max	Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen FAWA, 1996-2003 Bundesamt für Energie BFE, Worblenstrasse 32, CH-3063 Ittigen
[2]	Hubacher Peter Ehrbar Max	Grosswärmepumpen Phase 1, Schlussbericht Energetische und planerische Analyse von 10 Anlagen, Vergleich verschiedener Anlagenkonzepte
[3]	Friedl Markus	Exergieanalyse der Wärmepumpe im Schulhaus Limmat, Schlussbericht

ANHANG A

Anlagenanalyse

Anlage 4020

Anlagebeschreibung

Bei dieser Anlage liegt uns ein sehr detaillierter und informativer Bericht des Planers vor. Aus Anonymitätsgründen können wir dazu keinen Literaturhinweis machen.

Die Anlage 4020 ist eine Hotel- und Konferenzanlage mit mehreren Gebäuden verschiedener Nutzungsart. Die Wärme für Heizung und Warmwasser wird zentral aufbereitet und über zwei Nahwärmenetze unterschiedlichen Temperaturniveaus an die verschiedenen Objekte verteilt. Bei dieser Anlage handelt es sich um eine Sanierung einer bestehenden Wärmepumpenanlage. Anstelle der ursprünglich eingesetzten Luft-Wasser-Wärmepumpen wurden Wärmepumpen mit Erdwärmesonden eingebaut. Die Heizanlage ist bivalent. Für die Spitzenlastabdeckung ist ein Ölkessel vorhanden. Der Kessel trägt etwa 10 % zum Gesamtwärmeverbrauch bei. Der Mehrzwecksaal wird mechanisch gekühlt.

Tab. 1: Planungsdaten

Wärmeabgabeleistungen		
• Wärmepumpen	2x120	[kW]
• Heizkessel (Öl)	300	[kW]
COP Herstellerangabe (B0W50)	3.10	
Max. Vorlauftemperatur für Warmwasser	67	[°C]
Kältemittel	R134a	
Anteil WP an Gesamtwärmeerzeugung	95	[%]

Situationsplan, Disposition Objekte:

Es ist kein Situationsplan der Anlage verfügbar.

Hydraulisches Schema der Wärmeverteilung:

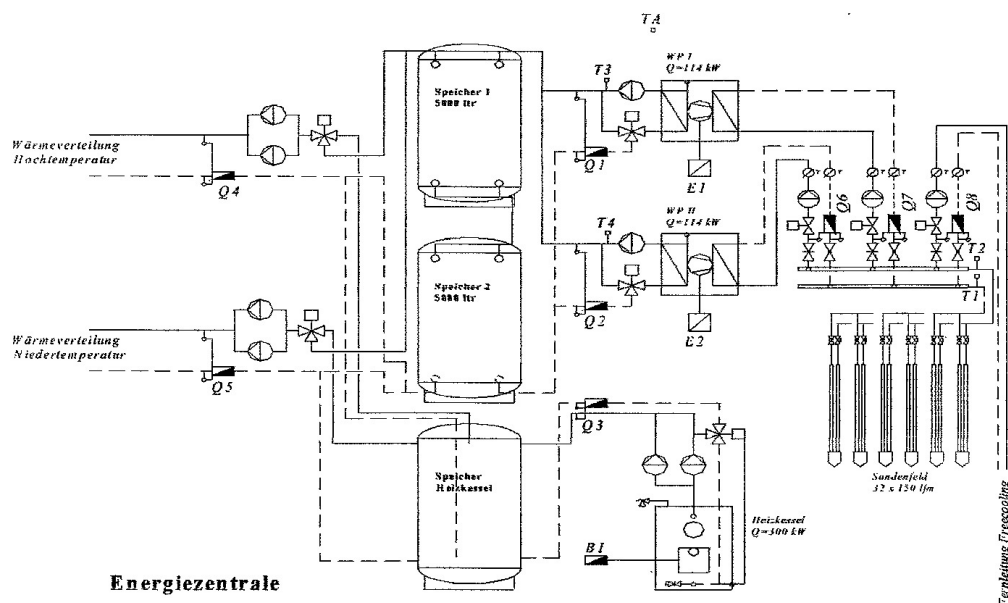


Abb. 1: Hydraulik-Schema der Wärmeerzeugung und -verteilung

Die Wärmeverteilung wird in ein Nieder- und ein Hochtemperaturnetz aufgeteilt, um den Bedürfnissen der verschiedenen Verbraucher gerecht zu werden. Der Niedertemperaturbereich (8 Heizgruppen im Wohnbereich) beansprucht etwa 60 % der Heizleistung. Der Hochtemperaturbereich speist die Warmwasseraufbereitung und die Luftheritzer. Dies ist eine geschickte Lösung, da sie es grundsätzlich ermöglicht, die Wärmepumpen mit dem jeweils günstigsten Heizgesetz zu betreiben. Der Heizkessel kann jedoch auf beide Netze geschaltet werden (Rückfallebene). Die Wärmepumpen arbeiten auf zwei Heizungsspeicher von je 5000 Litern Inhalt.

Die Aufschriebe zeigen, dass beide Wärmepumpen fast immer auf das etwa gleiche Temperaturniveau arbeiten. Einmal pro Woche wird das Warmwasser mit dem Heizkessel auf 67 °C erwärmt, um die Legionellen abzutöten.

Gemäss Angaben des Planers trägt der Heizkessel de facto etwa 10 % des Gesamtwärmebedarfs bei.

Beschreibung der Wärmepumpen und der Wärmequellen

Die Wärmepumpenanlage besteht aus einer zentralen Wärmepumpenanlage für alle Gebäude. Die Wärme für Heizung und Warmwasser wird über ein Nahwärmenetz an die Objekte verteilt.

Die Heizleistungen werden wie folgt angegeben:

Tab. 2: Spezifikationen der Wärmepumpen (Herstellerangaben)

	Arbeitspunkt [°C]	Heizleistung [kW]	Kältemittel
Wärmepumpen	B0/W50	2x120	R134a

Als Wärmequelle dient eine Erdwärmesondenanlage mit 33 Erdwärmesonden à ca. 150 m = 4765 m Länge. Die Soletemperaturen variieren zwischen rund 11 °C im Juli und etwa 6 °C im Februar. Im Mittel liegen die Soletemperaturen (Eintritt Wärmepumpe) bei etwa 8.4 °C und die Spreizung bei rund 1.6 K. Letzteres deutet darauf hin, dass der Massenstrom an der oberen Grenze liegt und damit auch der Pumpenstromverbrauch. Der Durchfluss durch die Erdwärmesonden wird durch eine Einzelpumpe bewerkstelligt, die auf einen Verteilbalken arbeitet. Die beiden Wärmepumpen beziehen die Sole mittels eigener Pumpe ab diesem Verteilbalken. Die erste Pumpe arbeitet also immer, auch wenn nur eine WP im Betrieb ist. Die Auslegung der Erdwärmesonden ist mit 38 [W/lfm] resp. 83 [kWh/a] sehr grosszügig.

Betriebskonzept Heizung

Die nachfolgenden Werte wurden aus den Aufschrieben des Betreibers resp. des Planers eruiert. Es handelt sich um die Mittelwerte zweier Jahre.

Tab. 3: Heizkurven (gemäss Reglereinstellung):

Objekt	Jan	Febr	Mrz	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez
Wärmepumpe 1	49.7	50.4	48.6	45.7	46.7			40.5	43.6	42.9	47.1	49.2
Wärmepumpe 2	48.2	49.3	48.6	46.1	48.5	45.9	59.53	61.47	48.8	47.2	48.0	49.2

Auffallend sind die hohen Vorlauftemperaturen von WP 2 in den Monaten Juli und August. Diese hohen Temperaturen dürften von der WW-Ladung herrühren (keine Heizung, nur Warmwasser, daher der hohe Durchschnittswert).

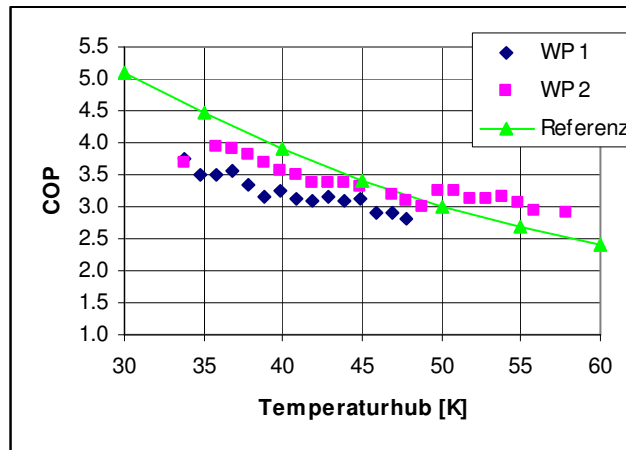


Abb. 2: Vergleich der gemessenen Tagesarbeitszahlen mit den COP des Herstellers (ohne Nebenantriebe). Die grüne Referenzlinie stammt von Typenprüfungen.

Betriebskonzept Warmwasser

Die Wärme für die Warmwasseraufbereitung wird von den zentralen Wärmepumpen und dem Heizkessel via Nahwärmenetz an 5 dezentrale Warmwasserspeicher von insgesamt 20'500 Liter Inhalt geliefert. Wöchentlich einmal wird die Warmwassertemperatur zwecks Legionellenvernichtung mit Hilfe des Heizkessels hochgefahren. Dies geschieht auch im Sommer. Im Sommer muss dafür der Heizkessel jedes Mal hochgefahren werden.

Der Planer weist darauf hin, dass die zentrale Warmwassererzeugung vor allem im Sommer ungünstig ist. Das Hochfahren des Nahwärmenetzes verbraucht offenbar viel Wärme, die nach dem Ladevorgang verloren geht. Leider können diese Verluste mangels verfügbarer Unterlagen nicht berechnet werden.

Nahwärmenetz

Es steht uns kein Plan des Nahwärmenetzes zur Verfügung. Es bestehen zwei Nahwärmenetze mit unterschiedlichem Temperaturniveau zur Verfügung. Das Niedertemperaturnetz speist die Wärmeverteilung an die Wohnräume, das Hochtemperaturnetz ist für die Warmwasserversorgung und die Lufterhitzer vorgesehen.

Wegen der recht weit auseinander liegenden Gebäude ist mit erheblichen Wärmeverlusten des Nahwärmenetzes zu rechnen.

Energiebilanz + JAZ

Die vorhandenen Messeinrichtungen (Elektro- und Wärmehzähler) sind auf die JAZ-Bestimmung der Wärmepumpen ausgerichtet. Die Wärmeverluste und die Aufheizverluste (im Sommer) der beiden Nahwärmenetze sind unbekannt, dürften aber erheblich sein. Die Disposition der 5 Wärmehzähler und der beiden Elektrozähler ist aus Abb. 3 ersichtlich. Hinzu kommt noch ein Elektrozähler der den Gesamtverbrauch der Wärmepumpen inklusive der Nebenantrieb erfasst. Der Ölverbrauch der Heizkessels wird mit einem Ölzähler gemessen.

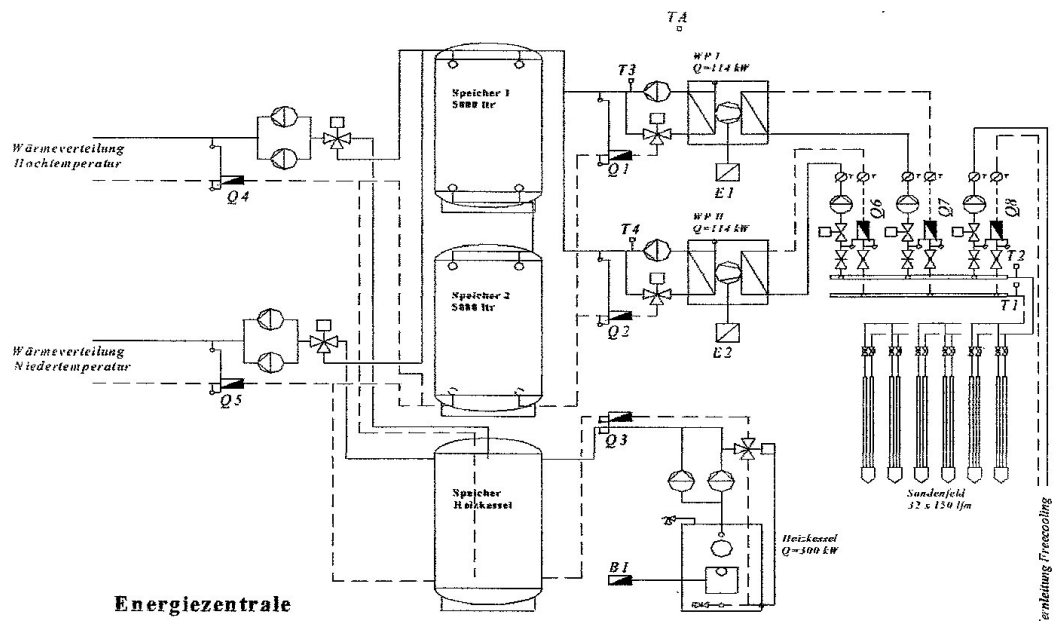


Abb. 3: Disposition der Messgeräte bei Anlage 4020

Für die Analyse der energetischen Situation der Anlage stehen uns folgende Ablesedaten zur Verfügung:

Tab. 3: Wärmeproduktion und Energieverbrauch Anlage 4020 (nur Wärmepumpe)

Zeile		Jahr 1	Jahr 2	Mittel	
1	Produzierte Wärme (Heizung+Warmwasser)	565'970	557'650	561'810	
	• davon Wärmepumpe 1	275'430	290'900	283'165	[kWh]
	• davon Wärmepumpe 2	290'540	266'750	278'645	[kWh]
2	Elektroverbrauch	188'893	183'243	186'068	
	• davon Kompressor Wärmepumpe 1	84'869	86'131	85'500	[kWh]
	• davon Kompressor Wärmepumpe 2	82'324	75'412	78'868	[kWh]
	• davon EWS- und Kondensatorpumpe 1	10'850 ¹⁷	10'850	10'850	[kWh]
	• davon EWS- und Kondensatorpumpe 2	10'850	10'850	10'850	[kWh]
3	JAZ Wärmepumpen	3.38	3.45	3.42	
4	JAZ Anlage (ohne Wärmeverluste Nahwärmenetz und Nahwärmenetzpumpen)	2.94	3.10	3.02 ¹⁸	

Man beachte, dass die Anlagen-JAZ die Wärme- und Aufheizverluste des Nahwärmenetzes sowie die elektrische Stromaufnahme der Nahwärmenetzpumpen nicht enthält. Effektiv liegt die Anlagen-JAZ tiefer.

Der elektrische Stromverbrauch für alle Nebenantriebe beträgt gemäss Ablesungen 53'909 [kWh/a]. Darin enthalten ist auch der Strom für den Brenner (vom Planer auf 700 [kWh/a] geschätzt), sowie für die Pumpen des Nahwärmenetzes und der Hausnetze. Der Pumpenstrom für die Erdwärmsonden und Kondensatorpumpen wird mit 10'850 kWh/a beziffert. Wenn man davon ausgeht, dass der Stromverbrauch der Umwälzpumpen in den Unterstationen etwa 1% des Wärmeverbrauchs ausmachen, also rund 5'620 kWh/a, so verbleibt ein Rest von rund 25'900 [kWh/a] für die Nahwärmenetzpumpen. Wenn man dies bei der Berechnung der Anlagen-JAZ berücksichtigt, so reduziert sich diese auf 2.65. Die Wärme- und Aufheizverluste im Nahwärmenetz sind aber weiterhin nicht berücksichtigt.

Der Anteil des Heizkessels betrug im ersten Betriebsjahr 8.0 % und im zweiten Betriebsjahr 10.6 %.

¹⁷ Mittelwert der zwei Messjahre

¹⁸ Es muss betont werden, dass die Wärme- und Aufheizverluste sowie die Pumpenenergie des Nahwärmenetzes nicht berücksichtigt sind. Die effektive Jahresarbeitszahl dürfte daher deutlich tiefer liegen (siehe weiter unten).

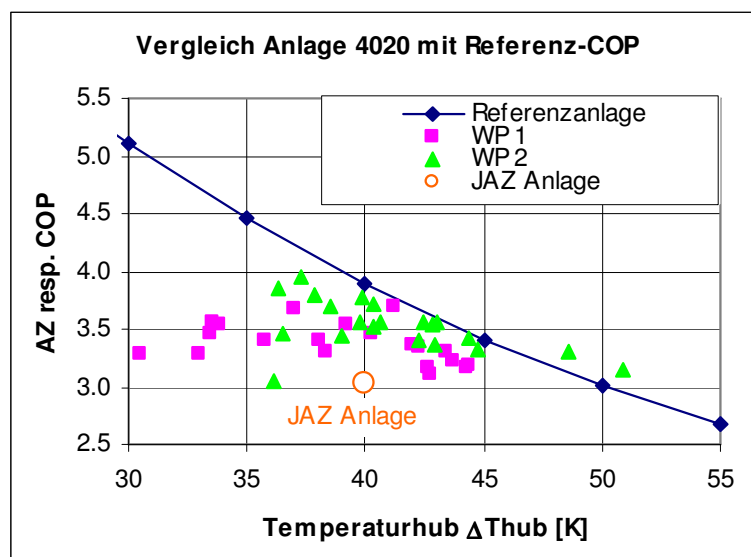


Abb. 4: Monatsarbeitszahlen der beiden Wärmepumpen (ohne Nebenantriebe)

Der Verlauf der monatlichen Arbeitszahlen gibt Rätsel auf. Vor allem WP 1 zeigt kaum eine Abhängigkeit von Temperaturhub, wobei diese Anomalität im zweiten Betriebsjahr geringer ausfällt. Bei WP 2 ist ein leichter Trend zu höheren Arbeitszahlen mit sinkendem Temperaturhub festzustellen.

Wirtschaftlichkeit

Investitionen

Tab. 4: Investitionen in die Heizanlage (inkl. 7.6% MWSt., Planungskosten eingerechnet)

Position	Werkverträge (inkl. 7.6 % WMSt)	Einheit
Erdwärmesondenanlage		
• Bohrung 4655 m	333'500	[Fr.]
• Sondenverteiler, Anschlussleitungen	65'500	[Fr.]
Wärmeerzeugung Wärmepumpen		
• 2 Wärmepumpen à 114 kW	192'000	[Fr.]
• Hydraulische Einbindung	60'400	[Fr.]
Nebenkosten		
• Bohrschlammentsorgung	35'600	[Fr.]
• Baumeisterarbeiten	56'900	[Fr.]
• Nebenarbeiten Wärmepumpen	15'500	[Fr.]
• Elektrische Verdrahtung	69'500	[Fr.]
DDC Leitsystem	56'600	[Fr.]
Total Wärmepumpenanlage (ohne Speicher)	885'500	[Fr.]
Investitionskosten Gesamtanlage pro kW installiert (Heiz-WP 228 kW)	3884	[Fr/kW]
Investitionskosten kW Quellenanlage pro kW Heizleistung	2550	[Fr/kW]

Tab. 5: Betriebskosten und Wärmepreis der Wärmepumpenanlage (inkl. MWSt.)

Position	Durchschnitt Jahr 1+2	Einheit
Energiekosten	30'777	[Fr]
Heizungsservice	11'460	[Fr]
Heizwartentschädigung	0	[Fr]
Total Heizkosten (ohne Kapitalkosten)	42'237	[Fr]
Wärmepreis (ohne Kapitalkosten)	7.51	[Rp/kWh]

Die Stromtarife betrugen im Sommer 11.0 resp. 7.0 Rp/kWh, im Winter 14.0/9.5 Rp/kWh. Der Kapitalkostenanteil wurde im Wärmepreis nicht berücksichtigt, da dieser von den gewählten Abschreibungsdauern und Zinssätzen abhängig ist. Da in Tab. 5 jedoch die Investitionen aufgeführt sind, kann der Kapitalkostenanteil jederzeit nach Massgabe der gewählten Parameter berechnet werden.

Erkenntnisse

1. Die Trennung in ein Nahwärmenetz für niedrige Systemtemperaturen (Raumheizung) und ein Nahwärmenetz für hohe Systemtemperaturen (Warmwasser und Lufterhitzer) ist an sich richtig. Dadurch können die beiden Wärmepumpen sich grundsätzlich an die erforderlichen Heizgesetze anpassen und es entstehen bessere Jahresarbeitszahlen. Im vorliegenden Fall scheint es aber so zu sein, dass dies nur unzulänglich möglich ist.
2. Die Wärme- und Aufheizverluste des Nahwärmenetzes dürften sehr hoch liegen, können aber nicht genau beziffert werden.
3. Die zentrale Warmwasserversorgung ist energetisch ungünstig. Auf diesen Umstand wurden wir bereits vom Planer hingewiesen.
4. Der Verlauf der COP- und JAZ-Werte in Funktion des Temperaturhubes ist merkwürdig. Möglicherweise ist ein zu kleines Expansionsventil eingebaut, das den internen Temperaturhub hochhält (Differenz von Kondensations- zu Verdampfungstemperatur).

Anlage 4022

Anlagebeschreibung

Die Anlage 4022 ist ein Wärmeverbund mit einer grossen Zahl verschiedener Nutzer. Die Wärmeerzeugung für Heizung und Warmwasser geschieht dezentral mittels Wärmepumpen und teilweise zusätzlich mit Heizkessel. Als Quellenwärme für die Wärmepumpen steht gereinigtes Abwasser aus einer nahe gelegenen ARA zur Verfügung. Die Quellenwärme wird unmittelbar neben der ARA über einen Wärmetauscher an den Zwischenkreis abgegeben (reines Wasser). Da zwischen ARA und Heizanlagen Höhenunterschiede bis 70 m zu überwinden sind, wurde im Rahmen einer Sanierung ein geschlossener Zwischenkreis gewählt. Ursprünglich war ein offener Zwischenkreis vorhanden, der sich aber nicht bewährte. Im Rahmen einer Sanierung wurde er in einen geschlossenen Kreis umgestaltet. Ein Teil der Wärmepumpenanlagen wird bivalent gefahren (Heizkessel). Für einige Wärmepumpen besteht ein zweiter Zwischenkreis.

Es handelt sich um einen Verbund mit kalter Verteilung der Quellenwärme. Wir können im Rahmen dieser Arbeit nur die Quellenseite bearbeiten. Eine Aufschlüsselung auf Heizwärme und Warmwasserbereitung ist auf Grund der mangelnden Datenbasis nicht möglich. Bei dieser Anlage steht klar das Verhalten der Wärmequellenanlage im Fokus.

Der Wärmebedarf der angeschlossenen Verbraucher beträgt im Endausbau 4'982 [MWh/a]. Derzeit werden jedoch nur 1'720 MWh/a bezogen. Die Wärmebedarfsleistung beträgt im Auslegungspunkt zurzeit 1'711 [kW].

Wärmequellenanlage

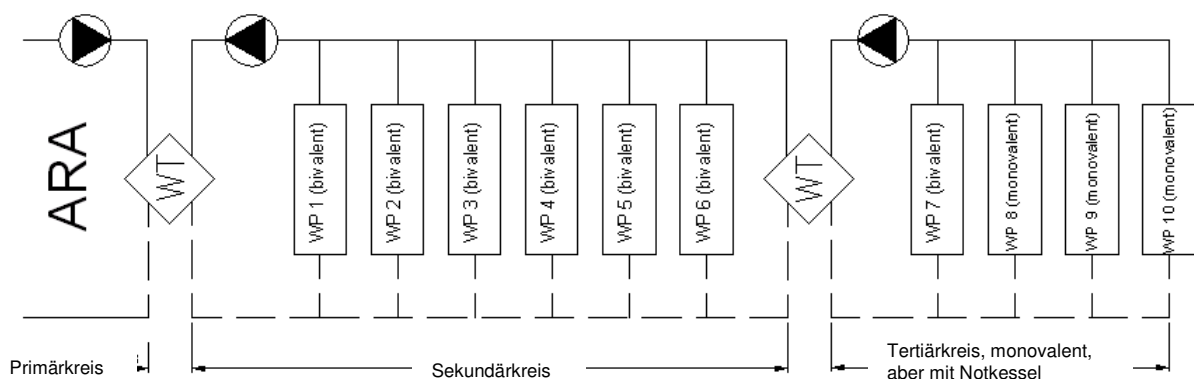


Abb. 1: Hydraulisches Schema der Wärmeerzeugung

Bei Anlage 4022 handelt es sich um eine Grossanlage mit Wärmegewinnung aus gereinigtem Abwasser und kalter Verteilung der Quellenwärme mit 10 grösseren angeschlossenen Unterstationen/Wärmepumpen. Die angeschlossenen Wärmepumpen weisen zudem einen Höhenunterschied bis über 70 m auf. Das kalte Wärmeverteilsystem war ursprünglich offen, was enorme Pumpendrücke und Pumpenleistungen erforderte. Es musste später in ein geschlossenes System umgebaut werden. Damit reduzierten sich die Pumpenleistungen deutlich. Die kalte Wärmeverteilung umfasst zwei resp. drei hydraulische Kreise in Serie. Die Quellenwärme wird über einen grosszügig dimensionierten Wärmetauscher an den Sekundärkreislauf abgegeben (Wasser). Dieser Sekundärkreislauf versorgt den Grossteil der Wärmepumpen mit Quellenwärme. Sämtliche angeschlossenen Heizanlagen sind bivalent. Um den statischen Druck im Sekundärnetz zu begrenzen, wurde für die am höchsten liegenden Wärmepumpen noch ein Tertiärkreislauf eingebaut. Wegen der dreistufigen Grädigkeit mussten gewisse Vorkehrungen gegen das Einfrieren des Tertiärkreises getätigt werden. Sobald die Temperatur im Tertiärnetz unter 8 °C fällt, wird dessen Temperatur mittels eines Heizkessels gestützt. Gemäss Angaben des planenden Ingenieurbüros tritt dieser Fall im Normalbetrieb jedoch nur selten auf. Während eines Messjahres wurden Primärkreistemperaturen (Vorlauf) von 7 bis 22 °C gemessen. Der Sekundärkreis lag etwa 2-3 K darunter.

Die kalte Verteilung der Quellenwärme ist an sich sinnvoll. Im vorliegenden Fall ist der ein bis zweifache Übergabe der Quellenwärme in Wärmetauschern mit thermodynamischen Verlusten gekoppelt. Wenn man von je 3 K Grädigkeit in den Wärmetauschern und der Faustregel, dass pro Kelvin Grädigkeit die JAZ um 2.5 % sinkt, ausgeht so wird im vorliegenden Fall die JAZ um 7.5 resp. 15 % reduziert. Wegen des ausgedehnten Quellenetzes treten auch grössere Pumpenstromverbräuche auf. Nach unseren Berechnungen liegen die hydraulischen Leistungen der drei Pumpen (3 hydraulische Kreise) bei 50 kW, was bei einem Pumpenwirkungsgrad von 70% einer elektrischen Leistung von 71 kW entspricht.

Tab. 1: Stromaufnahme der Pumpen

Kreis	Förderhöhe [mWS]	Fördervolumen [m ³ /h]	Hydraulische Leistung [kW]	Elektrische Leistung ($\eta=70\%$) [kW]
Primär	27.0	240	18.0	25.7
Sekundär	41.5	240	27.7	39.6
Tertiär	42.0	42	4.9	7.0
Total			50.6	72.3

Wenn mehrere Wärmepumpen am gleichen Quellenkreis hängen, kann davon ausgegangen werden, dass die Quellenpumpen während der ganzen Heizsaison von etwa 5000 h durchlaufen. Mit dieser Annahme kann der Stromverbrauch der Pumpen auf rund 360'000 kWh geschätzt werden. Gemäss Messung waren es im Jahr 2006 301'000 kWh bei 1.72 Mio. kWh produzierter Heizwärme und 803'000 kWh Stromverbrauch für alle angeschlossenen Wärmepumpen. Der Pumpenstromverbrauch erreicht damit (gemessene!) 37.8 % des gesamten Stromverbrauchs oder 62.9 % des Kompressorstromverbrauchs von 402'000 kWh. Der Wirkungsgrad der Pumpen ist mit 70% eher hoch angenommen. Bei Pumpen dieser Grössenordnung beträgt der Gesamtwirkungsgrad aus mechanischem und elektrischem Wirkungsgrad eher gegen 50%.

Energiebilanz + JAZ

Für die Analyse der energetischen Situation der Anlage stehen uns folgende Ablesedaten zur Verfügung:

Tab. 2: Wärmeproduktion und Stromverbrauch Anlage 4022

Zeile		2006	
1	Produzierte Wärme	1'720'000	[kWh]
2	Elektroverbrauch davon Wärmepumpen davon ARA-Pumpen	803'000 502'000 301'000	[kWh]
3	JAZ Anlage (Zeile 1/Zeile 2) JAZ Wärmepumpen	2.14 3.42	

Der Einfluss der Wärmequellenanlage auf die Jahresarbeitszahl der Anlage ist gross und macht den an sich guten Mittelwert der Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen zunichte. Die in Tab. 2 ausgewiesene Differenz der Jahresarbeitszahlen von Wärmepumpen und Anlage enthält die Grädigkeiten der Trennwärmetauscher noch nicht. Diese sind in der JAZ der Wärmepumpen versteckt und machen nochmals 7.5 % Reduktion aus. Ohne diese Grädigkeit würde sich der Mittelwert der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen auf etwa 3.68 erhöhen.

Wirtschaftlichkeit

Da bei dieser Anlage vor allem die Wärmequellenanlage interessiert, beschränken wir uns bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf diese Wärmequelle. Die Investitionen in die Quellenanlage betragen:

Tab. 3: Investitionen in die Heizanlage

Position	Werkverträge (inkl. 7.6 % WMSt)	Einheit
ARA-Pumpstation	900'000	[Fr]
Fernleitungen Sekundär- und Tertiärnetz	510'000	[Fr]
Pumpstation Tertiärnetz	125'000	[Fr]
Sanierung bestehender Teile	270'000	[Fr]
Restwert altes Netz (teilweise weiterverwendet)	1'125'000	[Fr]
Total	2'930'000	[Fr]
Investitionskosten in Quellenanlage pro kW Heizleistung	1712	[Fr/kW]
Investitionskosten pro kW Kälteleistung (1211 kW)	2420	[Fr/kW]

Die Berechnung der Investitionskosten für das Quellenwärmenetz ist etwas problematisch. Das ursprüngliche, offene Netz kostete 2.5 Mio Fr. Das geschlossene Netz umfasst die doppelte Leistungslänge, wäre somit noch etwas teurer, zumal der Primärwärmetauscher samt Sekundärpumpe hinzukommt. Die in Tab. 7 angegebene Investitionssumme dürfte trotzdem in etwa zutreffen.

Tab. 4: Betriebskosten pro Jahr, Anteil Wärmepreis (inkl. MWSt.)

Position	Betrag	Einheit
Energiekosten Pumpen	199'000	[Fr]
Heizungsservice	75'000	[Fr]
Verwaltungshonorar 3% (geschätzt)	8'220	[Fr]
Total Betrieb Quellenanlage	282'220	[Fr]
Anteil Wärmepreis (derzeitiger Ausbau)	16.4	[Rp/kWh]
Anteil Wärmepreis (Endausbau)	5.7	[Rp/kWh]

Der Anteil der Betriebskosten der Quellenanlage am Wärmepreis ist auch nach Erreichen des Vollausbaus mit 5.7 [Rp/kWh_{th}] sehr hoch.

Der Kapitalkostenanteil wurde im Wärmepreis nicht berücksichtigt, da dieser von den gewählten Abschreibungsdauern und Zinssätzen abhängig ist. Da in Tab. 7 jedoch die Investitionen aufgeführt sind, kann der Kapitalkostenanteil jederzeit nach Massgabe der gewählten Parameter berechnet werden. Bei 20 Jahren Abschreibungsdauer und 4 % Zins beträgt der Kapitalkostenanteil der Quellenanlage am Wärmepreis im Vollausbau 4.1 [Rp/kWh_{th}].

Erkenntnisse

1. Die kalte Verteilung der Quellenwärme hat den Vorteil, dass keine Wärmeverluste anfallen. Hingegen verbleibt der Aufwand für die Umwälzpumpen. Es sind sehr viele Verbraucher an den zwei Zwischenkreisen angeschlossen. Das kalte Fernwärmenetz hat eine einfache Länge von rund 2200 m. Da die angeschlossenen Wärmepumpen unkoordiniert arbeiten, ergeben sich sehr lange Laufzeiten für die Umwälzpumpen der Zwischenkreise und des Primärkreises. Dies belastet den Stromkonsum der Anlage. Es wäre zweckmässig, die Zwischenkreispumpe und auch die Primärpumpe frequenzgesteuert in Abhängigkeit der aktiven Wärmepumpen zu fahren (z.B. durch Konstanthalten der Spreizungen).
2. Bei den sehr grossen Höhenunterschieden der Objekte (bis zu 70 m) ist es richtig, einen geschlossenen Zwischenkreis zu wählen. Beim offenen Kreis werden die geodätischen Pumpenverluste hoch.
3. Da die Wärme kalt verteilt wird, können die verschiedenen Objekte mit individuellen Heizkurven gefahren werden. Bei warmer Verteilung müsste die Heizkurve dem höchsten Vorlaufbedarf angepasst werden.
4. Trotz der an sich richtigen Sanierung bleiben die Jahresarbeitszahlen tief. Eine Ursache liegt sicher im sehr hohen Stromverbrauch der Pumpen. Beim Vollausbau bessert sich die Jahresarbeitszahl.
5. Die Betriebskosten belasten den Wärmepreis mit einem Anteil von 6.7 Rp/kWh_{th} im Vollausbau. Dies ist sehr hoch. Rechnet man noch die Kapitalkosten von 4.1 Rp/kWh hinzu, so betragen allein die Kosten der Quellenanlage 9.8 Rp/kWh_{th}. Aus wirtschaftlicher Sicht ist dieses Konzept fraglich.

Anlage 4023

Anlagebeschreibung

Das Anlage 4023 ist eine Wohnüberbauung mit insgesamt 16 Mehrfamilienhäusern mit gutem Isolationsstandard. Die Anlage wird in Etappen erstellt. Bis 1. November 2007 waren sechs Einheiten fertig gestellt, bis Februar 2008 acht Einheiten. Die Erzeugung der Wärme für Heizung und Warmwasser erfolgt in einer Heizzentrale und wird über ein Nahwärmenetz an die 11 Objekte verteilt. Die Fernleitungen verlaufen alle in den unterirdischen Einstellhallen. Die Heizung besteht aus einer monovalenten Wärmepumpenanlage.

Tab. 1: Planungsdaten

	Ausbauzustand Februar 2008	Geplanter Vollausbau	
Wärmebedarfsleistung im Auslegungspunkt (Vollausbau)			
- Heizung	116.2	244.3	[kW]
- Warmwasser	140.0	280.0	[kW]
Vor-/Rücklauf ab Heizwärmepumpe	45/31	45/31	[°C]
Vor-Rücklauf ab WP für Warmwasser	58/50	58/50	[°C]
Warmwasserendtemperatur mit WP	50	50	[°C]
Warmwasserendtemperatur mit Nachheizung	60	60	

Situationsplan, Disposition Objekte:



Abb. 1: Situationsplan der Überbauung

Hydraulisches Schema der Wärmeverteilung:

Die Wärme für Heizung und Warmwasser wird zentral erzeugt und über ein Nahwärmenetz an die 11 Wohngebäude verteilt. In der Zentrale sind zwei serielle Speicher von je 3600 Liter Inhalt für das Heizungswasser vorhanden. Je Wohnhaus besteht eine Unterstation, in der der Wärmebedarf für die betreffende Wohneinheit ausgekoppelt wird. Die Heizkurven werden je Wohnhaus individuell eingestellt. Die Warmwassererzeugung erfolgt ebenfalls ab dem Nahwärmenetz in den Unterstationen. Jedes Wohnhaus verfügt über einen eigenen Warmwasserspeicher (Inhalt siehe Tab.4 Seite 46).

Wärmepumpen

Die Wärmepumpenanlage besteht aus drei je zweistufigen Heizwärmepumpen à 134.9 kW Nennleistung. Es sind 2 Speicher mit je 3600 Liter Inhalt vorhanden. Das Ein- und Ausschalten der Wärmepumpen erfolgt über die Speicher.

Die Heizleistungen der Wärmepumpen werden wie folgt angegeben:

Tab. 2: Spezifikationen der Wärmepumpen (Herstellerangaben)

	Arbeitspunkt [°C]	Heizleistung [kW]	Antriebsleistung [kW]	COP	Kältemittel
Wärmepumpen	W50/W10	3*147.0 ¹⁹	36.9	4.0	R134a

Man muss bei diesen Heizleistungen der Wärmepumpen berücksichtigen, dass pro Woche nur 95 Heizstunden vorgesehen sind. Für die Warmwasseraufbereitung sind maximal 56 Stunden pro Woche reserviert. Damit beträgt der planerische Wärmebedarf der Heizung am Auslegetag 5484 kWh/d was einen „verschmierten“ Heizleistungsbedarf von 229 kW ergibt (planerisch bei Vollausbau 244.3 kW).

Wärmequelle

Als Wärmequelle für die Heizwärmepumpe dient Frischwasser aus einer nicht mehr benutzten Trinkwasserfassung. Die Planung geht von 10°C Wassertemperatur aus. Der Wasserbedarf der Wärmepumpen beträgt je 30 m³/h. Der Druck in der Frischwasserleitung ist konstant 2.5 bar. Es sind vier Förderpumpen à 11 kW Nennleistung eingebaut. Der Abgang zu den Wärmepumpen erfolgt über ein fest eingestelltes Reduzierventil. Ein Dreiwegventil dient der Regelung der Quellenvorlauftemperatur. Es wird auch als Absperrorgan benutzt, wenn die WP steht. Damit ist die Wassermenge pro Wärmepumpe konstant, egal ob ein oder zwei Kompressoren in Betrieb sind.

Der elektrische Energieaufwand für die Frischwasserpumpen wird nicht bauseitig erfasst. Er ist recht hoch. Gemäss Aufschrieben betrug der Frischwasserverbrauch vom 31.5.2008 bis 8.6.2009 168'500 m³. Auf ein Jahr umgerechnet sind es 164'900 m³. Bei 2.5 bar Förderhöhe ergibt dies eine hydraulische Arbeit von 41.2 GJ oder 11'450 kWh. Wenn wir den Gesamtwirkungsgrad der Pumpen mit 50% annehmen, so beträgt die elektrische Energieaufnahme 22'900 kWh_{el}.

Betriebskonzept Heizung

Die Wärmepumpen werden lastabhängig zugeschaltet. Darüber hinaus besteht ein übergeordnetes Zeitschaltregime. Der Heizbetrieb ist von Montag bis Donnerstag von 0500 h bis 2100 h, am Freitag und Samstag von 0500 h bis 2200 h und am Sonntag von 0700 bis 2100 vorgesehen.

Tab. 3: Heizkurven (gemäss Reglereinstellung):

Objekt	Vorlauf bei -8°C	Rücklauf bei -8°C
Ab Wärmepumpe	45	31
Wohnhäuser	40	26
Warmwasserladung ab WP	58	
Warmwasserendtemperatur mit WP	50	
Nachheizung Widerstandheizung	60	

Die Heizgesetze der Objekte sind im Auslegungspunkt bei Ta -8°C auf 40 °C Vorlauf- und 26°C Rücklauf-temperatur eingestellt. Der Hauptvorlauf ab Wärmepumpe wird mit etwa 5 K Übertemperatur betrieben. Dies führt zu einer JAZ-Minderung von ca. 12.5 %.

¹⁹ Gemäss Planer betragen die Heizleistungen 134.9 kW pro WP. Der Arbeitspunkt ist nicht spezifiziert.

Warmwasser

Das Warmwasser wird im Normalfall ab der Fernleitung erzeugt. In jeder Unterstation steht ein Warmwasserspeicher mit innen liegendem Spiralrohrheizregister, das ab der Fernleitung gespeist wird. Einmal pro Woche wird mit einem Elektroheizregister nachgeheizt (Legionellenschaltung). Das Aufladen der Speicher geschieht grundsätzlich in der Nacht zwischen 2100 h und 0200 h. Bei Bedarf ist auch eine Tagesnachladung von 1300 h bis 1500 h vorgesehen. Da derzeit nicht alle Wohnungen belegt sind, ist tagsüber keine Nachladung erforderlich. Dadurch dass pro Tag zwei Zeitfenster für das Aufladen der Warmwasserspeicher vorgesehen sind, ist für eine gewisse Synchronisation aller Speicherladungen gesorgt. Dies reduziert die Anzahl der Temperaturerhebungen im Nahwärmenetz und damit der Transmissionsverluste im Nahwärmenetz. Die Grädigkeit des innen liegenden Spiralrohrwärmetauschers schätzen wir mit mindestens 5 K.

Mit den Wärmepumpen wird der Speicher auf 50°C aufgeladen (Vorlauf Nahwärmenetz ab Wärmepumpe 58°C). Im Warmwasserkonzept war pro Woche ein einmaliges Hochfahren auf 60°C vorgesehen (Legionellenschaltung). Auf Verlangen der Wohnungsbesitzer wird dieses Hochfahren nun täglich gemacht.

Tab. 4 Speichervolumina

Objekt	Volumen Warmwasserspeicher [dm ³]	Wärmeleistung Warmwasser [kW]	Wärmeleistung Heizung [kW]
Haus A1	1200	15	12.2
Haus A2	1200	15	12.6
Haus A3	1200	15	16.5
Haus A4	1200	15	16.5
Haus B1	2000	20	25
Haus B2	2000	20	25
Haus B3	2000	20	25
Haus C1	2000	20	25
Haus C2	2000	20	25
Haus C3	2000	20	25
Haus C4	2000	20	25
Total	18800	200	232.8

Im Sommerbetrieb muss das Nahwärmenetz mit 1454 Litern Inhalt für die Warmwasserbereitung zweimal pro Tag auf 58°C hochgefahren werden, was mit einem erheblichen Energieaufwand verbunden ist. Nach dem Aufladen der WW-Speicher kühlt sich das Nahwärmenetz aus. Diese Wärme ist verloren. Die daraus entstehenden Wärmeverluste haben zwei Komponenten. Während des Ladevorgangs muss einerseits das Wasservolumen des Nahwärmenetzes auf 58°C angehoben werden und parallel dazu geht Wärme an die Umgebung. Nach dem Ladevorgang kühlt sich das Nahwärmenetz wieder aus. Der Energieverlust durch Auskühlung muss beim nächsten Ladevorgang wieder zugeführt werden. Diese Art der Verluste tritt nur im Sommer, d.h. also ausserhalb des Heizbetriebes auf. Während des Heizbetriebes wird das Nahwärmenetz beim Laden des Warmwasserspeichers zwar ebenfalls auf höhere Temperatur gebracht. Nach dem Umschalten auf Heizbetrieb geht die erhöhte innere Energie des Netzes nicht verloren, sondern wird als Heizwärme genutzt. Allerdings erhöhen sich während des Ladebetriebs die Wärmeverluste an die Umgebung.

Bei der Berechnung der Auskühlverluste wurde von einer einmaligen Ladung pro Tag und von 10°C Starttemperatur des Nahwärmenetzes ausgegangen. Der Sommerbetrieb dauert 5 Monate, was gemäss Annahmen auf rund 225 Ladevorgänge führt. Pro Tag rechnen wir mit total 2 Stunden Laufzeit.

Tab. 5: Wärmebedarf für Temperaturerhöhung Nahwärmenetz

Anzahl Ladevorgänge pro Tag	Wärmebedarf Nahwärmenetz pro Ladevorgang [kWh]	Wärmebedarf Temperaturerhöhung Nahwärmenetz für 5 Monate [kWh]	Wärmeverlust Nahwärmenetz für 5 Monate Sommerbetrieb [kWh]	Zusätzlicher Wärmeverlust Nahwärmenetz für 7 Monate Winterbetrieb [kWh]	Gesamter Wärmekonsum ²⁰ Nahwärmenetz für Warmwasser [kWh]
Ein Ladevorgang pro Tag	45.2	6615	1660	948	9223
Zwei Ladevorgänge pro Tag	55.5	8318	1660	948	10926
Mittelwert		7467	1660	948	10075

Gebäudeintern ist eine Begleitheizung vorhanden. Diese wird jedoch in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt.

Nahwärmenetz

Die verschiedenen Wohngebäude sind heizungstechnisch über ein Nahwärmenetz verbunden. Die Hausnetze sind durch Trenn-Wärmetauscher vom Nahwärmenetz getrennt.

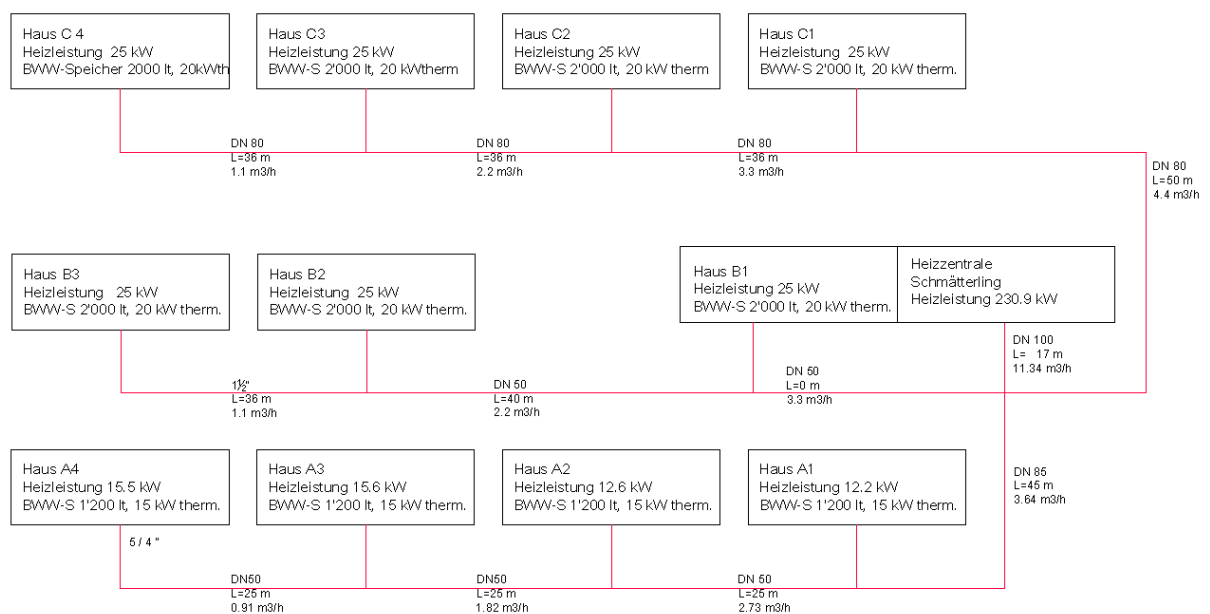


Abb. 2: Nahwärmenetz Anlage 4023

Die Leitungen verlaufen in Kellergeschossen resp. Tiefgaragen und sind somit nicht erdverlegt. Es wurden folgende Dimensionen eruiert:

²⁰ Bei zwei Ladevorgängen gleicher Gesamtdauer liegen die mittleren Vor- und Rücklauftemperaturen etwas höher als bei einmaliger Ladung. Dies wurde bei der Berechnung der Wärmeverluste an die Umgebung vernachlässigt.

Tab. 6: Technische Angaben zum Nahwärmenetz

Leitungs- abschnitt	Länge (einfach) [m]	Innen- durchmesser [mm]	k-Wert bezogen auf In- nendurchmesser [W/(m ² *K)]	Innen- Volumen der Rohre [dm ³]	Wärmeverlust- leistung im Jahresmittel [W]	Wärme- verluste pro Jahr [kWh]
A1	45	85	0.85	255.4	459.6	2298
A2	25	50	1.14	49.1	201.5	1007
A3	25	50	1.14	49.1	201.5	1007
A4	25	50	1.14	49.1	201.5	1007
B/C	17	100	0.58	133.5	139.4	697
B1	40	50	1.14	78.5	322.3	1611
B2	36	40	1.14	45.2	232.1	1160
C1	50	80	0.85	251.3	480.7	2403
C2	36	80	0.85	181.0	346.1	1730
C3	36	80	0.85	181.0	346.1	1730
C4	36	80	0.85	181.0	346.1	1730
Total	371			1454.1	3276.7	16383

Die Berechnung der Wärmeverluste basiert auf der Annahme von 10 °C Kellertemperatur, 40 °C mittlerer Vorlauftemperatur und 25 °C mittlerer Rücklauftemperatur, sowie 5000 Betriebsstunden (= 7 Monate) des Nahwärmenetzes. Die Gebäude haben einen guten Isolationsstandard, wodurch die Heizperiode eher kurz ausfällt.

Der Pumpenaufwand für das Nahwärmenetz setzt sich aus dem Pumpenaufwand für die Kondensatorpumpen und die Nahwärmenetzpumpen zusammen. Die Kondensatorpumpen arbeiten mit konstanter Drehzahl und zwar unabhängig davon, ob ein oder zwei Kompressoren aktiv sind. Die Nahwärmenetzpumpe arbeitet variabel und ist druckgesteuert. Die in Tab. 7 abgegebenen Werte sind eine Abschätzung:

Tab. 7: Laufzeiten und Energieverbrauch der Kondensatorpumpen und der Nahwärmenetzpumpen

Pumpe	Elektr. Leistung [kW]	Laufzeiten [h/a]	Stromverbrauch pro Jahr [kWh]
Kondensatorpumpe WP 1	0.55	1218	670
Kondensatorpumpe WP 2	0.55	1218+2104	1827
Kondensatorpumpe WP 3	0.55	1218+2104+824	2280
Nahwärmenetzpumpe	0.50	5000	2500
Total Nahwärmenetz			7277

Energiebilanz + JAZ

Laut hydraulischem Schema und Anlagebeschrieb sind folgende Wärmezähler eingebaut:

- Wärmezähler für Heizwärme am Ausgang der Unterstationen
- Wärmezähler pro Wohneinheit
- Wärmezähler an den WW-Speichern

Dazu kommt noch ein Wasserzähler für das Frischwasser der Wärmequelle und bei den Wärmepumpen. Nicht erfasst wird der Stromverbrauch für die Frischwasserpumpe. Wir haben diesen mittels des konstanten Förderdrucks und der durchgesetzten Wassermenge abgeschätzt und erhielten 37'444 kWh pro Jahr. Die Nahwärmenetzverluste werden nicht erfasst. Sie wurden rechnerisch nachgebildet.

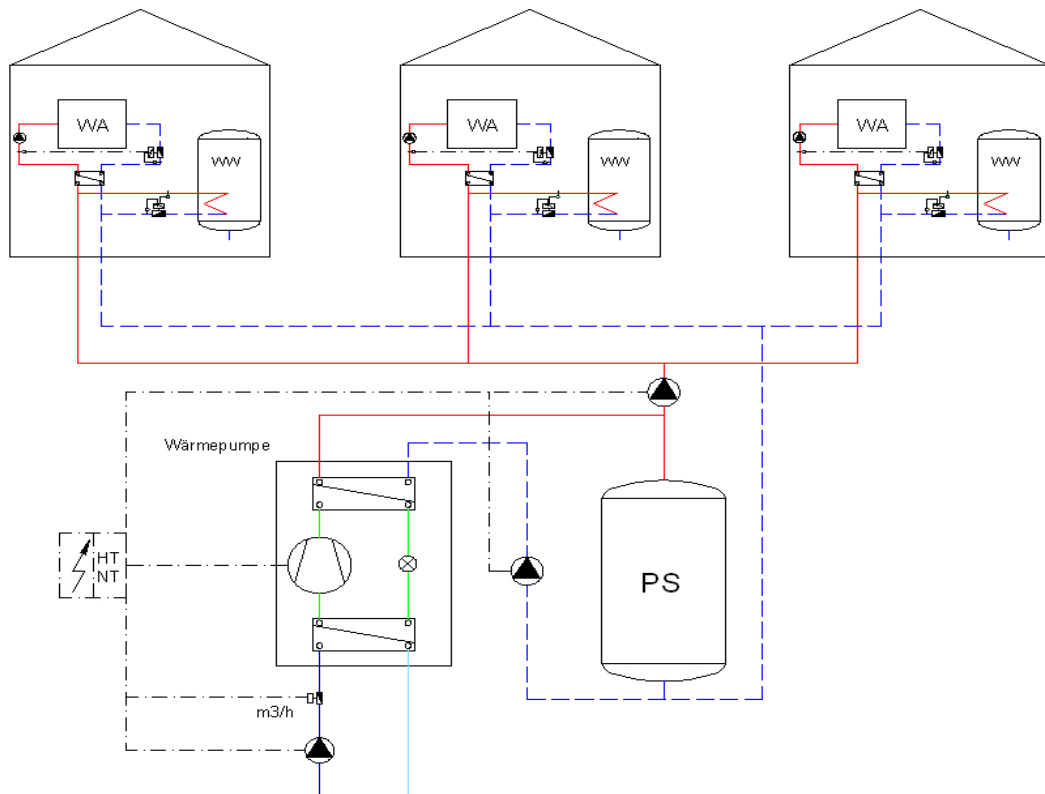


Abb. 3: Disposition der Messgeräte bei Anlage 4023

Für die Analyse der energetischen Situation der Anlage stehen uns folgende Ablesedaten zur Verfügung:

Tab. 8: Wärmeproduktion und Energieverbrauch Anlage 4023

Zeile		1.5.2008 - 30.4.2009	
1	Wärme an Raumheizung	350'927	[kWh]
2	Wärme für Warmwassererwärmung	16'198	[kWh]
3	Nutzwärmebedarf (Zeile 1+2)	367'125	[kWh]
4	Wärmeverluste Nahwärmenetz	16'383	[kWh]
5	Wärmeverluste Warmwasseraufladung (1.5x)	10'075	[kWh]
6	Total Wärmebedarf (Zeile 3+4+5)	393'583	[kWh]
7	Elektroverbrauch Kompressor WP	110'508	[kWh]
8	Elektroverbrauch Nahwärmenetz	7'277	[kWh]
9	Elektroverbrauch Wärmequelle	22'900	[kWh]
10	Total Strombedarf (Zeile 6-8)	140'685	[kWh]
11	JAZ Wärmepumpe (Zeile 6/Zeile 7)	3.56	
12	JAZ Anlage (Zeile 6/Zeile 10)	2.61	
13	Warmwasserverbrauch	unbekannt	[m3]
14	Frischwasserverbrauch (Wärmequelle WP)	168'500	[m3]

Es ergeben sich Ungereimtheiten beim Verbrauch an Quellenwasser. Der Verbrauch nach Hauptwasserzähler ist teilweise geringer als der Wasserverbrauch der Wärmepumpen. Zudem nimmt der Wasserverbrauch der Wärmepumpen im zweiten Betriebsjahr um den Faktor 4-5 ab.

Erkenntnisse

1. Im vorliegenden Fall wird die Warmwasserbereitung mit dem Nahwärmenetz gemacht. Im Sommerbetrieb bedeutet dies ein ein- bis zweimaliges Aufheizen des ganzen Wasservolumens des Nahwärmenetzes, das nach dem Aufladen wieder ungenutzt auskühlt. Auch hier wäre ein Konzept mit dezentralen WW-Wärmepumpen pro Unterstation energetisch besser. Als Wärmequelle könnte das vom Grundwasser direkt gespeiste Nahwärmenetz dienen.
2. Auch bei der Heizwärme wären dezentrale Wärmepumpen mit kalter Verteilung der Wärmequelle besser, da die Nahwärmeverluste entfallen und zudem das Heizgesetz der Wärmepumpe direkt an die Erfordernisse des Objekts angepasst werden kann. Auch der Trennwärmetauscher würde entfallen. Dies allein würde die Jahresarbeitszahl um etwa 18% verbessern.
3. Das Nahwärmenetz wird mit einer hohen Temperaturspreizung von bis zu 21 K im Auslegepunkt gefahren. Dadurch ergeben sich niedrige Wassergeschwindigkeiten und Druckabfälle im Nahwärmenetz und niedrige Pumpenstromverbräuche. Andererseits muss deswegen die Vorlauftemperatur um etwa 6 K angehoben werden, was die JAZ um 15% reduziert.
4. Den Nebenantrieben ist energetische Beachtung zu schenken. Im vorliegenden Fall wird das Frischwassernetz mit 4 bar Druck betrieben. Der Stromverbrauch dieser Pumpe wird nicht heizungsseitig erfasst. Nach unseren Abschätzungen ist der Stromverbrauch dafür recht hoch.
5. Die Warmwasseraufbereitung erfolgt ebenfalls mit den Heizwärmepumpen, mit Nachaufladung durch eine Widerstandheizung. Die Bewohner verlangen denn auch eine tägliche Nachladung auf 60°C mit der Widerstandheizung. Mit einer dezentralen WW-Aufbereitung könnte die Endtemperatur von 60°C ohne Probleme auch mit einer Wärmepumpe erzeugt werden. Dies reduziert den Stromverbrauch.
6. Die Wärmezufuhr zum Brauchwarmwasser erfolgt vom Nahwärmenetz direkt über ein im Speicher liegendes Rohrregister. Erfahrungsgemäss bedingt dies relativ hohe Grädigkeiten, was entsprechend hohe Vorlauftemperaturen bedingt. Ein aussen liegender Wärmetauscher könnte mit deutlich geringeren Grädigkeiten betrieben werden. Auf Grund der vorliegenden Informationen wird mit 58°C Vorlauf eine Warmwasserladung von 50°C erreicht. Mit einem aussen liegenden Wärmetauscher könnte die gleiche Warmwassertemperatur mit 53°C Vorlauf erreicht werden, womit sich die Arbeitszahlen für die Warmwasserladung etwa um 12.5 % verbessern. Das innen liegende Rohrregister hat den Vorteil, dass der Speicher sauber durchgeschichtet wird.

Anlage 4024

Anlagebeschreibung

Bei der Anlage 4024 handelt es sich um einen Hotelbetrieb mit Restauration und Seminarbetrieb. Die Anlage besteht aus 10 Objekten, die von einer zentralen Heizanlage mit Wärme für die Raumheizung und die Warmwasserbereitung beliefert werden.

Tab. 1: Planungsdaten

Wärmeleistung Heizung	130 ²¹	[kW]
Wärmeleistung Warmwasser	80 ²²	[kW]
Vorlauf/Rücklauf Heizung	45/38	[°C]
Vorlauf Warmwasser	60/45	[°C]

Beschreibung der Heizanlage

Die Heizanlage ist bivalent und besteht aus einer dreistufigen Wärmepumpe mit 128 kW Nennleistung, die sowohl mit Luft als Wärmequelle als auch mit Erdwärmesonden betrieben werden kann, einem mit Holz befeuerten Heizkessel (110 kW) und einem mit Öl befeuerten Heizkessel (250 kW). Bei Umgebungstemperaturen oberhalb von ca. 7°C arbeitet die Wärmepumpe mit Luft als Wärmequelle²³. Der Luftkühler wird mit dem gleichen Glykol-Wassergemisch durchströmt wie die Erdwärmesonde. Die Vorlauftemperatur wurde auf maximal 45°C begrenzt. Es sind zwei Pufferspeicher à je 5000 Liter Wassergehalt vorhanden.

Disposition Objekte:

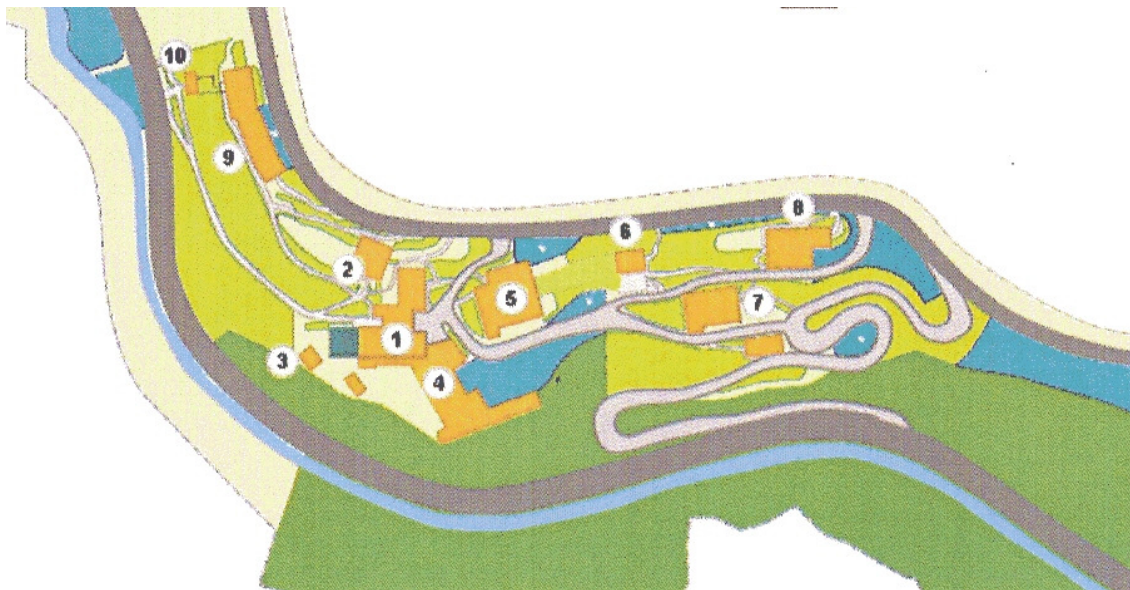


Abb. 1: Disposition der Gebäude von Anlage 4024 (680 m.ü.M.)

²¹ Kondensatorleistung

²² Kondensatorleistung

²³ Je nach Quelle wird der Umschaltzeitpunkt mit 3 resp. 7°C angegeben.

Hydraulisches Schema der Heizanlage:

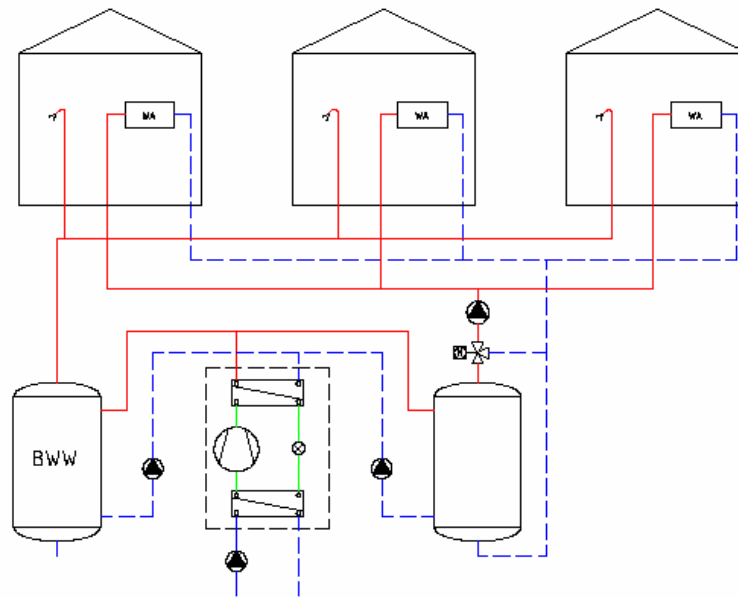


Abb. 2: Hydraulisches Schema der Wärmeverteilung 4024

Die Wärmeerzeuger liefern die Wärme an zwei Heizungspufferspeicher à je 5000 Liter Inhalt und einen Warmwasserboiler von 2000 Liter Inhalt.

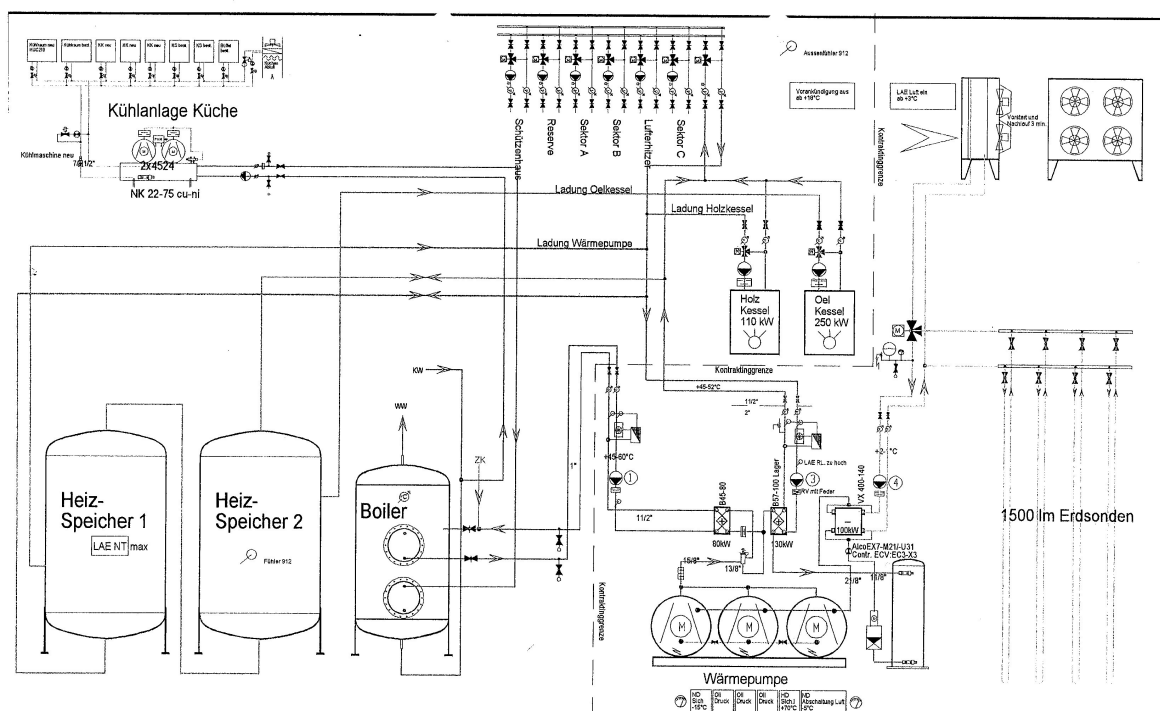


Abb. 3: Hydraulisches Konzept der Heizanlage

Wärmequelle

Die Wärmepumpe hat zwei Wärmequellen zur Verfügung. Einerseits besteht eine Erdwärmesondenanlage mit 1500 m Länge (6 mal 250 m) und andererseits ein Luftkühler, der ab 7 °C zugeschaltet wird. Die Umschaltung von der einen zur anderen Wärmequelle erfolgt auf der Wärmeträgerseite. Der Wärmeträger ist ein Wasser/Glykol-Gemisch, das bezüglich Gefrierschutz für die tiefen Lufttemperaturen eingestellt ist.

Bei den gegebenen Systemtemperaturen (max. 45°C Vorlauf für die Heizung) darf mit einer Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe allein von etwa 4.0 ausgegangen werden. Bei 128 kW Heizleistung beträgt die Verdampferleistung somit 96 kW. Daraus errechnet sich eine Sondenbelastung von 64 [W/lfm]. Gemäss Abschnitt „Energiebilanz und JAZ“ betrug die Wärmeproduktion der Wärmepumpe im Jahr 2008 rund 375'400 kWh und die Wärmeentnahme aus den Wärmequellen 281'550 [kWh]. Wenn wir von 7°C Umschalttemperatur ausgehen, entfallen etwa 82% auf die Erdwärmesonde und 18% auf den Luftkühler. Bei 3°C Umschalttemperatur sind es 67% resp. 33 %. Dadurch wird die Erdwärmesonde entlastet. Für 7°C Umschalttemperatur beträgt die energetische Sondenbelastung 154 [kWh/a], bei 3°C Umschalttemperatur 123 [kWh/a]. Die spezifische Sondenbelastung ist relativ hoch.

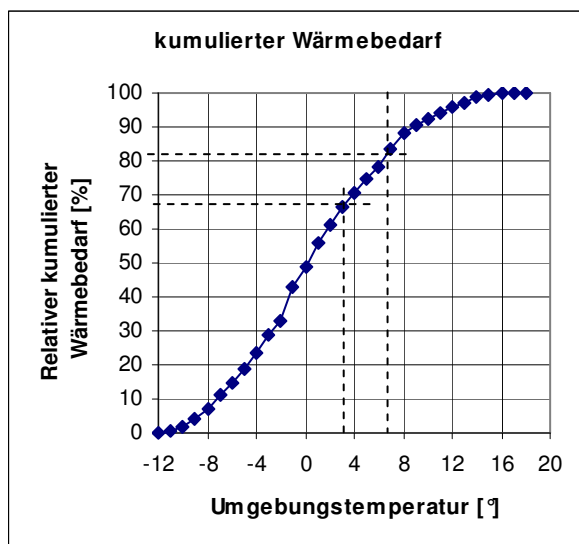


Abb. 4: Anteil Erdwärmesonde resp. Luft an Wärmequelle²⁴

Für die Pumpenleistungen wurde auf die Planungsdaten zurückgegriffen resp. Schätzungen anhand vergleichbarer Anlagen getätigt. Danach gelten folgende Angaben:

Tab. 2: Pumpenleistungen und Laufstunden

Pumpe	Elektrische Leistung [W]	Laufstunden [h]	Stromverbrauch [kWh/a]
EWS-Pumpe	620	3427	2132
Ventilator Luftkühler	3500	685	2399
Total			4531

Die gewählte hydraulische Schaltung mit einem gemeinsamen Kreislauf zwischen Luftkühler, Erdwärmesonde und Verdampfer würde es auf einfache Weise gestatten, die Erdwärmesonde im Sommer mittels des Luftkühlers zu regenerieren.

Warmwasser

Das Warmwasser wird mit der zentralen Wärmepumpe aufbereitet. Das heisse Kältemittelgas strömt nach dem Kompressor der Reihe nach durch den Warmwasserwärmetauscher (Enthitzer) und anschliessend durch den Kondensator für das Heizwassers. Der Warmwasserwärmetauscher ist für 80 kW und der Kondensator für das Heizungssystem für 130 kW ausgelegt. Der Warmwasserwärmetauscher ist nur aktiv, wenn die Umwälzpumpe im Warmwasserkreis läuft.

Das zentral erzeugte Warmwasser wird an 3 Gebäude verteilt (Hauptgebäude, Schützenhaus und Schulhaus). Die anderen Gebäude haben einen Kombiboiler (Sommerbetrieb mit Elektroregister, Winterbetrieb mit der Fernleitung).

²⁴ Dieser Verlauf gilt für Sargans. Da der Standort der Anlage etwa 200 Meter höher liegt, liegen die Temperaturen etwa um 1 bis 1.5 K tiefer. Der Anteil der Temperaturen unterhalb 3 resp. 7°C nimmt daher etwas zu.

Die Zirkulationspumpe hat keine Schaltuhr.

Es ist ein Wärmezähler für die Warmwasseraufbereitung eingebaut. Hingegen fehlt eine separate Messung des Stromverbrauchs für die Warmwasserbereitung.

Tab. 3: Wärmeproduktion für das Warmwasser [kWh]

Jan08	Feb08	Mrz08	Apr08	Mai08	Jun08	Jul08	Aug08	Sep08	Okt08	Nov08	Dez08
1335	1010	810	1417	883	999	2302	1287	547	982	1018	972
Total 13562 [kWh/a]											

Die Warmwasserversorgung ist mit einer Zirkulation zwischen dem zentralen Speicher und den dezentralen Objekten ausgestattet. Der Wärmeverbrauch des Warmwassersystems beträgt rund 4 % der gesamten Wärmeproduktion. Das scheint für einen Hotelbetrieb sehr wenig.

Bezüglich Jahresarbeitszahl der Warmwassererzeugung kann man sich nur auf den Monat Juli 2008 beziehen. Dort betrug die Wärmeproduktion 5473 kWh und der Stromverbrauch 2169 kWh. Dies ergäbe eine Arbeitszahl von nur 2.52. Es ist nicht ganz klar, welche weiteren Verbraucher am gleichen Elektrozähler angeschlossen sind. Es ist anzunehmen, dass insbesondere die Zirkulationspumpe mitgezählt wird. Dies reduziert die Arbeitszahl.

Das gewählte System mit zentralem Warmwasserspeicher und einer Zirkulation zwischen Speicher und Objekten dürfte trotz geringer Leistungsdurchmesser und guter Isolation hohe Wärmeverluste aufweisen.

Nahwärmenetz

Es bestehen zwei Nahwärmenetze. Einerseits das Nahwärmenetz für die Raumwärme und andererseits dasjenige für das Warmwasser.

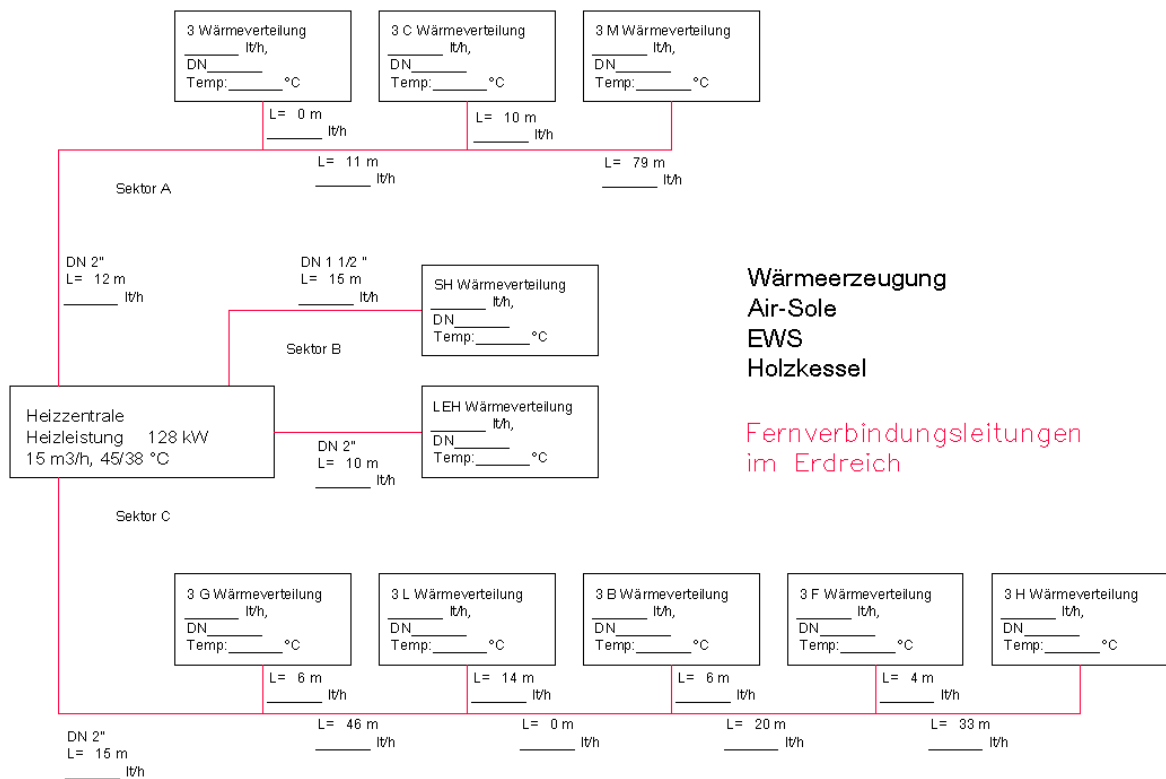


Abb. 5: Schematisch dargestelltes Nahwärmenetz

Für die Pumpenleistungen wurde auf die Planungsdaten zurückgegriffen. Danach gelten folgende Angaben:

Tab. 4: Pumpenleistungen und Laufstunden

Pumpe	Elektr. Leistung [W]	Laufstunden [h]	Stromverbrauch [kWh]
Kondensatorpumpe Heizung	253	3427	866
Kondensatorpumpe Warmwasser	84	170	7
Nahwärmenetzpumpe (Schätzung)	66	5000	330
Total			1203

Die einfache Länge des Nahwärmenetzes beträgt 271 m. Dies gilt auch für die Warmwasserversorgung. In beiden Fällen existieren Rückleitungen, sodass die effektive Länge sich verdoppelt. Es liegen uns keine weiteren Angaben zu den Dimensionen des Nahwärmenetzes vor. Eine Abschätzung anhand einer ähnlichen Anlage²⁵ lässt Wärmeverluste von etwa 10'000 [kWh/a] vermuten.

Energiebilanz + JAZ Heizung:

Den Hauptteil der Wärmeerzeugung übernimmt die Wärmepumpe. Der Ölverbrauch des Heizkessels war in der Messperiode null. Ebenso wurde kein Holz verbrannt.

Tab. 5: Wärmeproduktion und Stromverbrauch Anlage 4024 (Heizung und Warmwasser)

2008	Wärmeproduktion WP			Stromverbrauch WP		
	Heizung	Warmwasser	Total			
Januar	47'946	1'335	49'281		17334	[kWh]
Februar	35'800	1'010	36'810		13113	[kWh]
März	36'101	810	36'911		13368	[kWh]
April	49'277	1'417	50'694		18546	[kWh]
Mai	21'011	883	21'844		7785	[kWh]
Juni	12'591	999	13'590		4644	[kWh]
Juli	3'171	2'302	5'473		2169	[kWh]
August	5'110	1'287	6'397		2733	[kWh]
September	20'566	547	21'113		8103	[kWh]
Oktober	39'054	982	40'036		14523	[kWh]
November	43'628	1'018	44'646		15480	[kWh]
Dezember	47'580	972	48'552		17202	[kWh]
Total	361'835	13'562	375'397		135000	[kWh]

Die Jahresarbeitszahl soll aufgeschlüsselt werden:

Tab. 6: Jahresarbeitszahl

1	Wärmeproduktion WP	375'397	[kWh/a]
2	Wärmeverluste Nahwärmenetz Heizung (Schätzung)	10'000	[kWh/a]
3	Wärmeverlust WW-Zirkulation (Schätzung, $\Delta T=40$ K)	21'800	[kWh/a]
4	Wärmebedarf netto für Heizung und Warmwasser	343'597	[kWh/a]
5	Stromverbrauch brutto	135'000	[kWh/a]
6	Stromverbrauch Wärmequelle	4'531	[kWh/a]
7	Stromverbrauch Nahwärmenetz	1'203	[kWh/a]
8	Stromverbrauch Wärmepumpe	129'266	[kWh/a]
9	JAZ Wärmepumpe (Zeile 1/Zeile 8)	2.90	
10	JAZ Anlage (Zeile 4/Zeile 5)	2.54	

²⁵ Anlage 4025 hat in etwa die gleiche Heizleistung und die gleichen Systemtemperaturen. Die Nahwärmenetzlänge ist dort 17 % kürzer, dafür die Heizleistung 14 % höher.

Hier ergeben sich Widersprüche. Die abgeschätzten Wärmeverluste in der Zirkulationsleitung (21'800 [kWh/a]) sind grösser als die gemessene Wärmeproduktion für die Warmwasserbereitung (13'562 [kWh/a]). Wie schon weiter oben angeführt, haben wir bezüglich des Anteils Warmwasser am Gesamtwärmeverbrauch gewisse Zweifel (Messfehler?).

Erkenntnisse:

1. Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe selber ist trotz guter Voraussetzungen eher niedrig.
2. Das Konzept mit zentralem Warmwasserspeicher und Zirkulation zu den dezentralen Objekten ist energetisch ungünstig.
3. In vorliegenden Fall wären aus energetischer Sicht dezentrale Wärmepumpen mit kalter Wärmeverteilung besser.

Anlage 4025

Anlagebeschreibung

Zur Analyse dieser Anlage stehen uns Unterlagen des Betreibers, sowie ein Expertenbericht einer separaten Untersuchung zur Verfügung.

Bei der Anlage 4025 handelt es sich um eine Wohnüberbauung mit 8 Mehrfamilienhäusern und 1 Reiheneinfamilienhaus, die von einer zentralen Wärmepumpenanlage mit Wärme für die Beheizung und Warmwasser versorgt wird. Die Wohnanlage wird etappenweise erstellt, wobei die Wärmepumpe von Beginn weg für die volle Leistung ausgestattet wird. Derzeit ist etwa die Hälfte der vorgesehenen Gebäude erstellt. Als Wärmequelle dient Grundwasser. Planungsjahr ist 2000/01.

Tab. 1: Planungsdaten Vollausbau

Wärmeleistungsbedarf		
• Heizung	275	[kW]
• Warmwasser	180	[kW]
Installierte Wärmeleistung der WP	320	[kW]
Vorlauf ab Wärmepumpe im Auslegepunkt (-8°C)	46	[°C]
Warmwasserendladetemperatur		
• Wärmepumpe	54	[°C]
• Elektroregister (Legionellenschaltung)	>60	[°C]

Disposition Objekte:

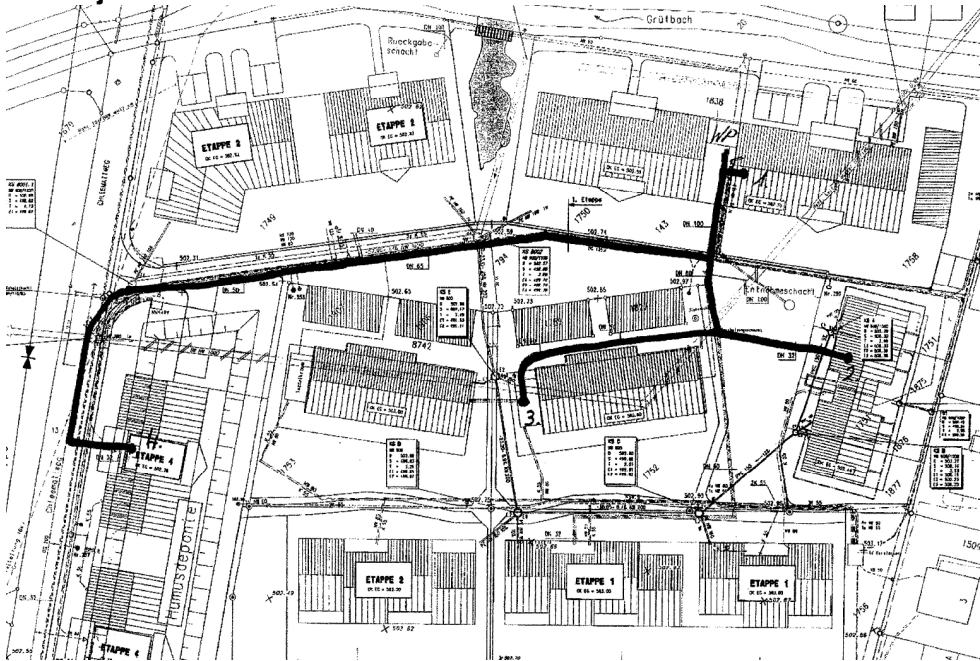


Abb. 1: Disposition der Gebäude (Höhe 500 m.ü.M.)

Seit dem 17.2.2009 sind vier Unterstationen in Betrieb. Deren Planungsleistungen werden wie folgt angegeben:

Tab. 2: Auslegeleistungen der Unterstationen

Unterstation	Heizleistung [kW]	Warmwasser [kW]
1	55	40
2	11	20
3	45	50
4	35	30
Total	146	140

Da uns nur Ablesedaten für die Jahre 2007 und 2008 zur Verfügung stehen, berücksichtigen wir bei den folgenden Analysen die vierte Unterstation nicht.

Beschreibung der Heizanlage

Die monovalente Heizanlage besteht aus einer vierstufigen Wärmepumpe mit 320 kW Nennleistung (4 Leistungsstufen), die als Wärmequelle Grundwasser nutzt. Die Wärmepumpe versorgt sowohl die Raumheizung als auch das Warmwasser mit Wärme.

Die Unterstationen umfassen die Objektregulierung und die Warmwasserbereitstellung. Es sind keine Trenn-Wärmetauscher für die Heizkreise vorhanden. Dadurch werden JAZ-Minderungen durch die Grädigkeit der Trenn-Wärmetauscher vermieden.

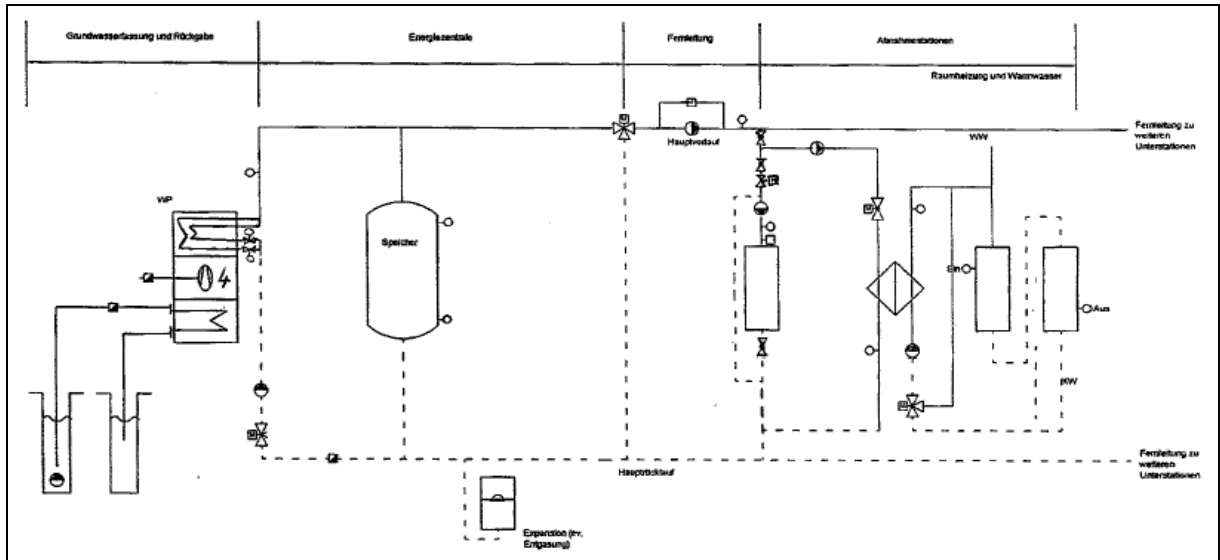


Abb. 2: Hydraulisches Konzept der Heizanlage 4025

Die Heizanlage umfasst zwei Regelkreise für die Wärmeversorgung der Objekte, nämlich eine Regelung der Vorlauftemperatur der Fernleitung, sowie eine Regelung der Vorlauftemperaturen der einzelnen Objekte. Der Heizungsspeicher hat einen Inhalt von 2800 Litern.

Wärmepumpenanlage

Die Wärmepumpenanlage besteht aus zwei kälteseitig getrennten Kreisläufen. Jeder Kreislauf hat 2 Kompressoren. Somit stehen vier Leistungsstufen zur Verfügung. Da bislang jedoch nur etwa die Hälfte der Überbauung realisiert ist, wurden nur zwei Leistungsstufen frei gegeben.

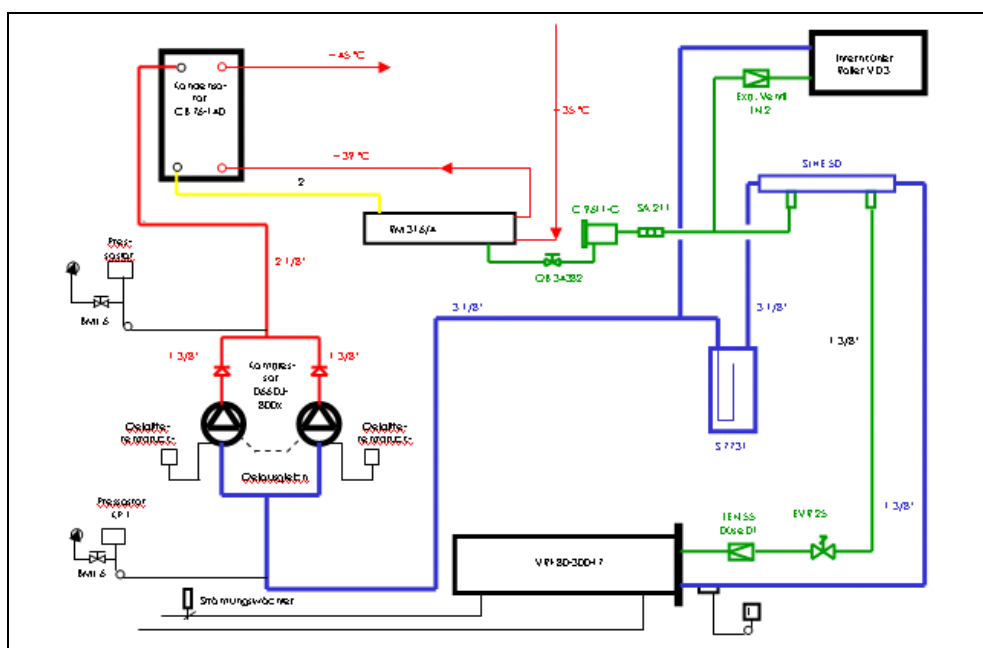


Abb. 3: Kältekreis der Wärmepumpe (Kältemittel R134a)

Die Wärmepumpe ist mit einem Unterkühler zur Nutzung der Restwärme der Flüssigkeit und einem mit dem warmen Kondensat beheizten Sauggasüberhitzer ausgestattet. Sie ist vierstufig.

Interessant ist der Vergleich der COP-Werte mit typengeprüften Maschinen des Wärmepumpentest-zentrums Buchs. Die COP-Werte sind in Abhängigkeit vom Temperaturhub Quelle-Vorlauf WP aufgetragen. Die Anlage 4025 liegt einiges tiefer als die Vergleichswerte.

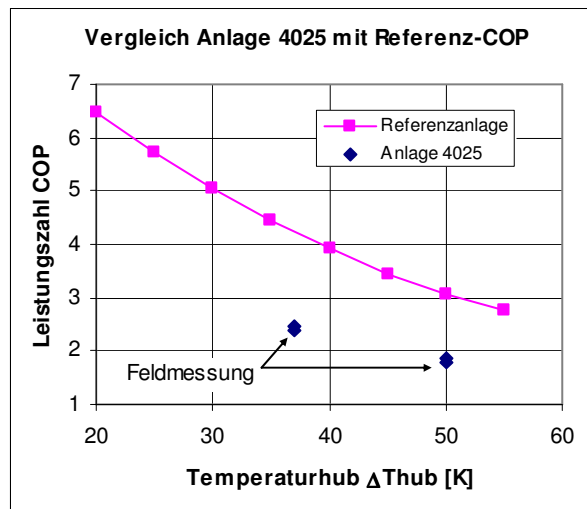


Abb. 4: Vergleich des COP-Verlaufs der Anlage 4025²⁶ und von typengeprüften Wärmepumpen [2].

Die wesentlich tiefere Gesamtlage der Leistungszahlen aus den Feldmessungen in Abb. 4 findet ihre Begründung u.a. im Teillastbetrieb bei gleich bleibenden Leistungen der Nebenantriebe und der Nebenantriebe selbst. In den Typenprüfungen sind die Nebenantriebe gemäss Prüfnorm EN 14511 nur mit sehr geringen Leistungen berücksichtigt.

Wärmequelle

Als Wärmequelle dient Grundwasser. Für die Grundwasserpumpenleistung stehen zwei Pumpen zur Verfügung, wobei im Normalfall nur eine in Betrieb ist. Die zweite steht als Reserve zur Verfügung. Die Pumpen werden mit Prioritätenwechsel gefahren (nach jeder Einschaltung der WP wird die Priorität gewechselt). Die Grundwassertemperatur beträgt fast konstant 10.3 °C²⁷. Die Temperaturspreizung wurde mit 1.46 K mit nur einer aktiven Wärmepumpe gemessen, was mit Bezug auf die notwendige Grundwasserpumpenleistung zu gering ist. Die Verdampfungstemperatur liegt bei 5 °C. Die Entnahmel Leitung ist 34.6 m lang und die Rückgabelleitung 58.8 m. Beide Leitungen haben einen Durchmesser von 100 mm. Das Fördervolumen der Grundwasserpumpe beträgt 49.27 m³/h und die elektrische Nennleistung 7.5 kW. Die Laufzeit der Grundwasserpumpe beträgt 4'077 h/a. Mit diesen Daten errechnet sich ein jährlicher Strombedarf von rund 30'600 kWh für die Grundwasserpumpe.

Betriebskonzept Heizung

Die Wärmepumpe wird eingeschaltet, wenn der Vorlauf der Fernleitung 2 K unter die Heizkurve der Fernleitung fällt (mit 5 Minuten Verzögerung). Der Ausschaltbefehl kommt, sobald die Speichertemperatur unten 50 °C überschreitet. Sperrzeiten werden durch das EVU vorzeitig angezeigt. Sobald diese Vorankündigung erfolgt, wird der Heizungsspeicher zwangsgeladen.

Die Fernleitung wird nach Heizgesetz gefahren, während die Objektregelungen durch Raumfühler erfolgen. Die Einstellung der Vorlauftemperaturen erfolgt durch Drei-Weg-Ventile. Die Heizkreisvorlauftemperaturen betragen im Auslegungspunkt (-8 °C) 43 °C. der Fernleitungsvorlauf ist demgegenüber um 3 K überhöht. Er beträgt also 46 °C bei -8 °C Aussentemperatur.

²⁶ Die vier Arbeitspunkte der Anlage 4025 stammen aus einer Expertise an der gleichen Anlage.

²⁷ Diese Angabe stammt aus einem Expertenbericht zur selben Heizanlage.

Die Heizkurve der Fernleitung beträgt:

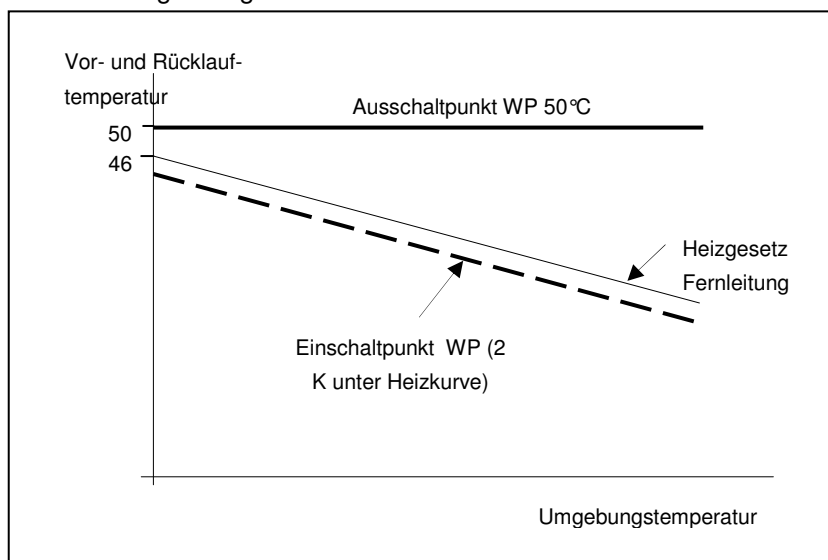


Abb. 5: Ein- und Ausschaltregime der Wärmepumpe

Tab. 3: Heizkurven (gemäss Reglereinstellung):

Objekt	Vorlauf bei -8 °C	Vorlauf bei +15 °C
Wärmepumpe, Ausgang Kondensator	46 °C	
Unterstationen	43 °C	nach Raumregelung Gebäude

Betriebskonzept Warmwasser

Die Erwärmung des Warmwassers erfolgt in den Unterstationen der Wohngebäude via einen aussen liegenden Wärmetauscher. Das Aufladen der Warmwasserspeicher erfolgt primär in den Nachtstunden. Dazu muss der Vorlauf des Nahwärmenetzes auf 60 °C hochgefahren werden (am Eintritt zum WW-Wärmetauscher 57.5 °C). Das Einschalten der Warmwasserladung erfolgt, wenn der obere Temperaturfühler im Warmwasserspeicher 38 °C meldet und schaltet aus, wenn der untere Fühler 50 °C erreicht. Während des Ladevorgangs werden Temperatur im Zwischenkreis (Primärseite des Wärmetauschers mittels des Drei-Weg-Ventils des Primärkreises auf 57.5 °C und die Warmwassertemperatur auf der Sekundärseite des Warmwasser-Wärmetauschers auf 50 °C gehalten. Die Ladung erfolgt grundsätzlich nachts. Es gilt Zwangsladung für alle Boiler. Für das Nachladen während des Tages gilt ebenfalls Zwangsladung für *alle* Speicher, wenn *einer* der Speicher Wärme verlangt. Dadurch kann man davon ausgehen, dass pro Tag zwei Ladevorgänge stattfinden.

Tab. 4: Warmwasserverbräuche

Periode	Verbrauch [m ³ /a]	Wärmebedarf ²⁸ [kWh/a]
2003/2004	1100.83	51'213
2004/2005	1294.28	60'213
2005/2006	1284.36	59'751
2006/2007	1128.48	52'499
2007/2008	1223.46	56'918
2008/2009	1130.04	52'572

²⁸ Gerechnet aus Erwärmung von 15 auf 50 °C (Endtemperatur Wärmepumpe).

In obiger Tabelle wird der Wärmebedarf für eine Anhebung der Wassertemperatur von 10 auf 50 °C berechnet (ohne Verluste). Dies ergibt 46.5 [kWh/m³]. Der Betreiber rechnet in der Heizkostenabrechnung mit 58 kWh pro m³ Warmwasser.

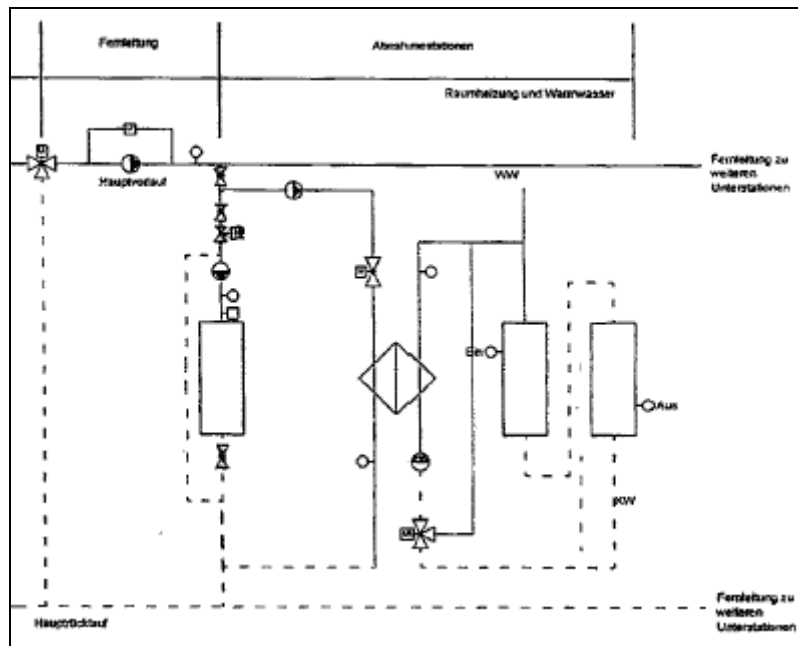


Abb. 6: Hydraulische Einbindung der Warmwasseraufbereitung in den Unterstationen

Das Anfahren der Speicherladung erfolgt so, dass zunächst die Fernleitung auf 60 °C hochgefahren wird. Der Primärkreis der WW-Ladung wird auf 57.5 °C gefahren. Sobald beim Anfahren des Primärkreises eine Temperatur von 48 °C erreicht ist, wird die Sekundärpumpe eingeschaltet und der Ladevorgang des WW-Speichers beginnt.

Einmal pro Woche wird das Warmwasser mittels eines Elektroheizregisters auf 60 °C erwärmt (Legionellenschaltung).

Wir können die Wärmemengen zum Aufheizen des Nahwärmenetzes anhand des Inhaltes des Nahwärmenetzes in etwa abschätzen. Der Inhalt der Leitungen des Nahwärmenetzes beträgt 1480 Liter (siehe Abschnitt „Nahwärmenetz“). Das Nahwärmenetz kühlt nach dem Aufladen bis zur nächsten Aufladung nicht komplett aus. Die Auskühlung hängt einerseits von der Anzahl Aufladungen und andererseits vom Rohrdurchmesser ab. Diese Abkühlungen wurden rechnerisch ermittelt, wobei der Mittelwert zwischen Vor- und Rücklauf beim Start der Auskühlung mit 55 °C und die Erdreichtemperatur mit 10 °C angenommen wurden.

Für den Sommerbetrieb rechnen wir mit 132 Tagen ohne Heizung. Bei ein- bis zweimaliger Ladung pro Tag folgen aus dieser Annahme 198 Aufladungen, woraus sich ein Wärmeverlust von ca. 9'812 [kWh] ergibt.

Interessant ist ein Vergleich der Volumina des Nahwärmenetzes und der Warmwasserspeicher.

Tab. 5: Inhalte der WW-Speicher (Stand 2008)

Unterstationen	Inhalt Warmwasserspeicher [dm ³]
1	1720
2	920
3	1720
4	?
Total	4360
Nahwärmenetz+Heizungsspeicher	1460+2800

Beim Hochfahren des Nahwärmenetzes im Sommer wird auch die Wassertemperatur des Heizungsspeichers mit 2'800 Litern Inhalt erhöht. Dies ist rund das Doppelte des Inhalts des Nahwärmenetzes. Andererseits ist der Speicher gut isoliert, sodass die Auskühlung sehr langsam erfolgt.

Die Warmwasserverteilung innerhalb der Objekte ist mit einer Begleitheizung ausgestattet. Diese deckt die Wärmeverluste von Speicher und Verteilnetz. Da wir die Bilanzgrenze der Energiebilanz nur bis zu den Unterstationen ziehen, wird die Begleitheizung in dieser Energiebilanz nicht berücksichtigt.

Nahwärmenetz

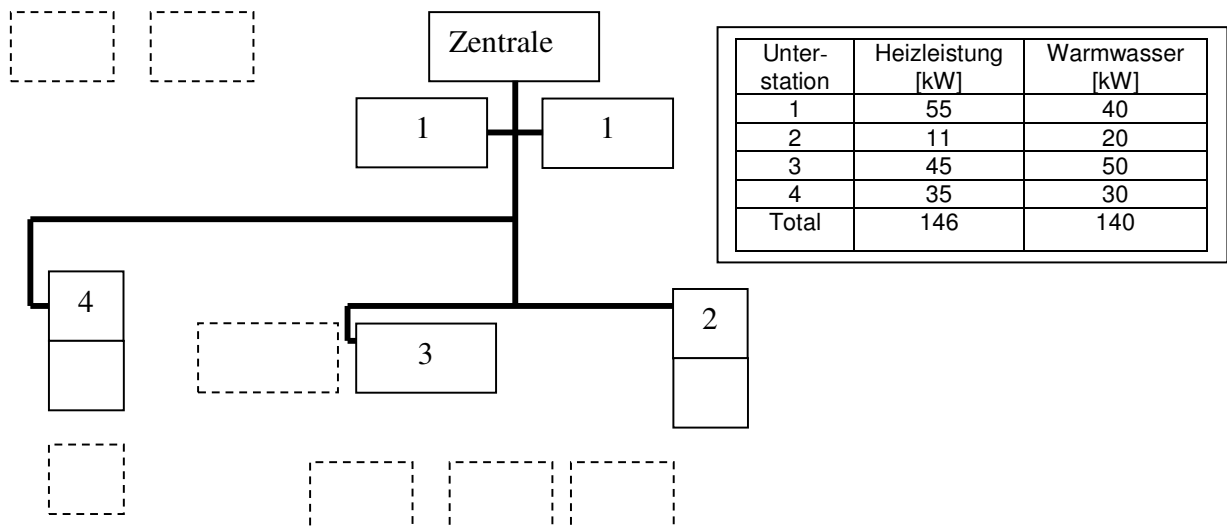


Abb. 7: Nahwärmenetz Anlage 4025

Die Wohngebäude sind durch ein erdverlegtes Nahwärmenetz mit der Heizzentrale verbunden. Als Nahwärmenetz betrachten wir die Leitungen zwischen der Heizzentrale und den Unterstationen. Jedes Nahwärmenetz hat Wärmeverluste an die Umgebung.

Zudem verbrauchen die Umwälzpumpen des Nahwärmenetzes elektrische Energie. Wenn auch das Warmwasser zentral erzeugt wird, und dies ist bei dieser Anlage der Fall, muss das Nahwärmenetz bei jeder Speicherladung auf 60°C hochgefahren werden. Im Sommer kühlt das Nahwärmenetz nach dem Ladevorgang wieder aus. Die zuvor aufgewendete Wärme zu dessen Erwärmung ist verloren. Während des Heizbetriebs, kommt diese Wärme der Heizung zu Gute. Die Verluste reduzieren sich dann auf den elektrischen Energieaufwand für die Pumpen und die etwas höheren Wärmeverluste an die Umgebung.

Für die Bestimmung der Nahwärmeverluste müsste eine Wärmemessung Seite Heizzentrale als auch Seite Unterstationen und ein Elektrozähler für die Umwälzpumpen des Nahwärmenetzes vorhanden sein. Dies ist nicht der Fall. Daher müssen wir die Nahwärmeverluste abschätzen. Die Wärmeverluste schätzen wir auf Grund der Transmissionsverluste rechnerisch ab. Ebenso die elektrische Energieaufnahme der Umwälzpumpe. Die Wärmeverluste des Nahwärmenetzes im Sommer ergeben sich aus der Erwärmung des Wasservolumens des Nahwärmenetzes und des Heizungsspeichers auf 60°C. Das Wasservolumen kann auf Grund der Leitungsdimensionen berechnet werden. Trotz des fast doppelt so grossen Volumens wie beim Nahwärmenetz betragen die Auskühlverluste des Heizungsspeichers nur etwa 40 % der Auskühlverluste des Nahwärmenetzes. Der Grund liegt in der guten Isolation und dem viel geringeren Verhältnis von Oberfläche zu Inhalt beim Speicher (Nahwärmenetz 30.33 m²/m³, Heizungsspeicher 4.01 m²/m³).

Tab. 6: Dimensionen und Wärmeverluste im Nahwärmenetz 4025

Abschnitt	Länge (einfach)	Innendurchmesser	k-Wert	Volumen (doppelt)	Wärmeverlust ²⁹ Heizbetrieb Winter	Wärmeverlust Warmwasserbetrieb Sommer
	[m]	[mm]	[W/mK]	[dm ³]	[W]	[W]
1	5.8	101	0.58	92.0	49.9	95.6
2	3.2	52	1.14	13.3	27.7	53.1
3	14.9	101	0.58	236.4	128.2	245.6
4	12.3	83	0.85	131.5	127.4	243.9
5	22.0	33	1.46	37.6	156.5	299.7
6	38.9	52	1.14	162.1	337.2	645.7
7	69.4	70	0.85	534.2	609.7	1167.5
8	65.5	52	1.14	272.9	567.8	1087.3
Total	232.1			1480.0	2004.5	3838.4
Wärmeverlust					11225 [kWh]	998 [kWh]
Zusatzwärmeverlust WW im Winter					1282 [kWh]	
Aufheizverluste WW im Sommer						9812 [kWh]
Total Wärmeverluste					12507 [kWh]	10810 [kWh]

Daraus errechnet sich ein Wärmeverlust pro Jahr von 23'317 kWh bei angenommenen 5600 Heizstunden (Jahr 2008), wovon 12'092 kWh zu Lasten der Warmwasserbereitung gehen. Der elektrische Energieverbrauch der Kondensatorpumpe und der Nahwärmenetzpumpe errechnet sich aus den Nennleistungen und den Laufstunden. Er beträgt 2'039 resp. 5'396 kWh (Jahr 2008).

Die Wärmeverluste verursachen auch einen Temperaturabfall längs der Transportleitung. Der Vorlauf ab Kondensator müsste um diesen Temperaturabfall höher gefahren werden, um die von den Unterstationen verlangten Heizgesetze erfüllen zu können. Die Nachrechnung hat ergeben, dass sich dieser Temperaturabfall im längsten Strang um etwa 0.2 K bewegt, was einer JAZ-Verminderung von ca. 0.5 % entspricht. Daher verzichten wir auf eine Berücksichtigung dieses Temperaturabfalls.

Laufzeiten

Die aufsummierten Laufstunden der Kompressoren betrugen 2008 4946 Stunden. Auffallend ist, dass die Kompressoren 3 und 4 (Wärmepumpe 2) nur sehr wenige Laufstunden aufweisen. Da keine Angaben zu den Laufzeiten der Grundwasserpumpen und der Kondensatorpumpen, sowie der Nahwärmenetzpumpen vorliegen, mussten diese abgeschätzt werden.

Bei der Nahwärmenetzpumpe sind wir von 5600 Heizstunden für den Winterbetrieb und weitere 396 Stunden für den Warmwasserbetrieb im Sommer ausgegangen. Da die Gebäude normal isoliert sind, wird eine Heizgrenze von 18°C unterlegt. Daraus ergibt sich ein Heizbetrieb von kumuliert rund 5600 Stunden oder 233 Tagen. Der Sommerbetrieb (Warmwasser) dauert somit 132 Tage. Für das Aufladen der Speicher rechnen wir im Sommer mit 3 Stunden pro Tag (1 bis 2 Aufladungen pro Tag). Daraus ergibt sich die Laufzeit der drei Pumpen im Sommer (396 h).

In der Heizperiode unterscheiden sich die Pumpenlaufzeiten der Grundwasser- und Ladekreispumpe von derjenigen der Nahwärmenetzpumpe. Letztere läuft kontinuierlich durch, erstere arbeiten nur, wenn mindestens ein Kompressor aktiv ist. Die minimale Laufzeit dieser Pumpen entspricht der längsten Laufzeit eines Kompressors (hier Kompressor 2 mit 2045 Stunden). Werden hingegen die Kompressoren bedarfsabhängig zugeschaltet, so erhöht sich die Laufzeit von Grundwasser- und Ladepumpe. Da die Kompressoren 3 und 4 nur eine kurze Laufzeit ausweisen, sind wir von einem nur zweistufigen Betrieb ausgegangen. In Anbetracht des fehlenden Vollausbau der Überbauung genügen zwei Kompressoren leistungsmässig knapp. Mit diesen Annahmen berechnen sich die Laufzeiten der Grundwasser- und Kondensatorpumpen auf 4131 h.

²⁹ Heizbetrieb: Mittelwert Vorlauf 37°C, Rücklauf 30°C

Tab. 7: Laufzeiten

Position	Laufzeit Kompressoren 2008 [h]	Laufzeit beide Kompressoren parallel arbeitend [h]	Laufzeit Kompressoren bedarfsgesteuert [h]
Kompressor 1	2030		
Kompressor 2	2045		
Kompressor 3	433		
Kompressor 4	438		
Kondensatorpumpe		3829 (1095)	5226 (1095)
Grundwasserpumpe		3829 (1095)	5226 (1095)
Nahwärmenetzpumpe		6000	6000

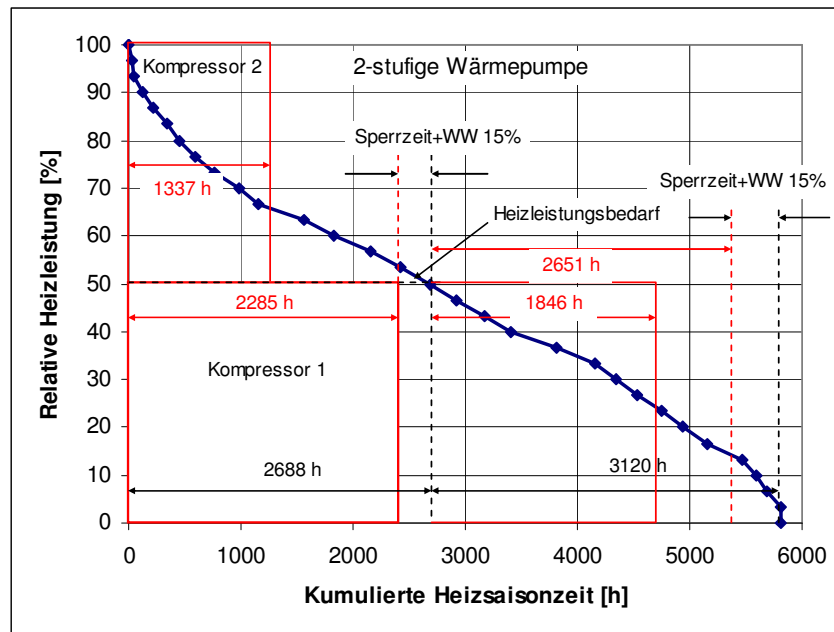


Abb. 8: Bestimmung der Laufzeiten der Kompressoren und Nebenantriebe

Die Bestimmung der Laufzeiten der Wärmepumpen ist aus Abb. 8 ersichtlich. Diese Abbildung gibt nur die Laufstunden für die Heizwärmeproduktion wieder. Die Laufstunden für die Warmwasserproduktion muss hinzuaddiert werden (Annahme: pro Tag 3 Stunden). Auf Grund der ermittelten Laufzeiten vermuten wir, dass immer beide Kompressoren pro Wärmepumpe parallel arbeiten. Wir gehen daher bei der Bestimmung der elektrischen Energieaufnahme von 3829 Laufstunden aus.

Energiebilanz + JAZ:

Es werden detaillierte Aufschriebe der Wärme- und Strommengen der Wärmepumpe geführt. Man beachte, dass im Messjahr 2008 nur 3 Unterstationen in Betrieb waren.

Es kann davon ausgegangen werden, dass in den Sommermonaten Juli bis August die Wärmepumpe nur für die Warmwasserversorgung gearbeitet hat. Unter dieser Annahme ergeben sich für die Arbeitszahlen der Warmwasserversorgung im Sommer Werte von 1.77 im Jahr 2007 und 1.85 im Jahr 2008. Diese Werte gelten für den Sommerbetrieb, wo Aufheizverluste des Nahwärmenetzes und des Heizungsspeichers anfallen. In der Heizsaison fallen diese Verluste weg, da der erhöhte Wärmeinhalt (innere Energie) der Raumheizung zugute kommt.

Tab. 8: Wärmeproduktion, Stromverbrauch und JAZ der Anlage 4025 (Heizung und Warmwasser)

	Wärmeproduktion WP [kWh]		Stromverbrauch WP [kWh]		JAZ	
	2007	2008	2007	2008	2007	2008
Januar	43650	49780	17670	18891		
Februar	38540	43510	15783	17061		
März	38110	42570	16101	17199		
April	18280	32240	8739	13428		
Mai	13940	12360	6891	5811		
Juni	6670	6930	3660	3462	1.82	1.77
Juli	5890	5720	3414	2955	1.73	1.94
August	6100	5800	3441	3174	1.77	1.83
September	12590	17790	5901	7578		
Oktober	28020	27660	11520	11985		
November	44240	41950	16743	15897		
Dezember	54170	55960	20121	20829		
Total	310'200	342'270	129984	138270		
Abzügl. Nahwärmenetz- verluste	-11'225 ³⁰ -1'282 ³¹ -998 ³²	-11'225 -1'282 -998				
Abzügl. Aufheizverluste WW im Sommer	-9'812	-9'812				
Nettowärmebedarf	286'883	318'953			2.21	2.31

Zusammenfassend erhalten wir folgende Tabelle:

Tab. 9: Energiebilanz und JAZ

Zeile	Position	2007	2008	Einheit
1	Wärmeproduktion WP	310'200	342'270	[kWh/a]
2	Wärmeverluste Nahwärmenetz + Aufheiz- verluste Sommer	23'317	23'317	[kWh/a]
3	Netto-Wärmebedarf Heizung+Warmwasser	286'883	318'953	[kWh/a]
4	Stromaufnahme total	129'984	138'270	[kWh/a]
5	Stromaufnahme Wärmequelle	28'718	28'718	[kWh/a]
6	Stromaufnahme Nahwärmenetz und Kon- densatorpumpe	7'311	7'311	[kWh/a]
7	Stromaufnahme Kompressoren	93'955	102'241	[kWh/a]
8	JAZ Wärmepumpe (Zeile 3/Zeile 7)	3.30	3.35	
9	JAZ Anlage (Zeile 3/Zeile 4)	2.21	2.31	

Die Laufstunden der Kompressoren zeigen, dass selbst im Hochwinter praktisch nur zwei Leistungsstufen aktiv waren. Hier ist noch ein Detail interessant. Gemäss Planung sollte jeder Kompressor im Nennpunkt 80 kW Wärmeleistung erbringen. Wenn man für die Jahre 2007 und 2008 die produzierte Wärmemenge durch die Summe der Laufzeiten aller Kompressoren dividiert, so erhält man im Heizbetrieb 67.1 resp. 66.6 kW pro Kompressor.

³⁰ Wärmeverluste im Heizbetrieb (5600 h)

³¹ Zusätzliche Wärmeverluste während Warmwasserbetrieb im Winter (700 h)

³² Wärmeverluste im Sommerbetrieb (396 h)

Erkenntnisse/Verbesserungsmöglichkeiten

1. Die zentrale Warmwasserversorgung führt vor allem im Sommer wegen der Auskühlverluste des Nahwärmenetzes und des Heizungsspeichers zu höheren Verlusten. Eine kalte Verteilung der Quellenwärme und dezentrale Wärmepumpen wären energetisch von Vorteil.
2. Der Aufladevorgang des Warmwassers erfolgt über mehrere Temperaturstufen. Der Vorlauf des Nahwärmenetzes wird auf 60°C angehoben. Der Mischkreis auf der Primärseite des Warmwasserwärmetauschers wird auf 57.5°C heruntergemischt. Damit werden 2.5 K „verschenkt“, die die JAZ um etwa 7.5% reduzieren. Dadurch kann mit dem 60°C-Vorlauf ab Wärmepumpe nur 54°C warmes Wasser erzeugt werden.
3. Der Heizungsspeicher wird ganzjährig auf 50°C gefahren. Der Hauptvorlauf wird erst nach dem Speicher mittels eines Drei-Wege-Ventils auf den Wert der Heizkurve heruntergemischt. Dadurch muss die Wärmepumpe im Jahresmittel auf eine etwa 8 K höhere Temperatur arbeiten als notwendig. Dies entspricht einer JAZ-Minderung von 20%.
4. Der Hauptvorlauf wird auf einer 3 K höheren Temperatur gefahren als es bezüglich der Heizkreise notwendig wäre. Auch dies reduziert die JAZ um etwa 7.5 %.
5. Alle diese JAZ-Reduktionen entfallen, wenn man pro Objekt resp. Unterstation eine separate Wärmepumpe einbaut. Die gemessene Jahresarbeitszahl könnte damit von 2.26 (Jahresmittel 2007 und 2008) auf etwa 3.20 angehoben werden. Damit könnte die JAZ insgesamt etwa 40% höher liegen als der aktuelle Wert.
6. Die Grundwasserpumpe hat nur eine Stufe. Dadurch wird unabhängig von der Leistungsstufe der Wärmepumpe immer die gleiche Grundwasser-Pumpenleistung abgerufen. Nach unseren Abschätzungen verbraucht die Grundwasserpumpe jährlich etwa 28'700 kWh Strom. Würden zwei Pumpen mit halber Leistung eingebaut, könnten vermutlich etwa 50% Pumpenstrom eingespart werden.

Die angegebenen Verbesserungen bedürfen insofern einer Einschränkung, als die Messdaten auf einer erst zu 50% realisierten Überbauung basieren. Bei Vollausbau nimmt nicht nur der Wärmebedarf zu. Es kommen auch weitere Nahwärmenetzlängen hinzu, sodass sowohl die Wärmeverluste im Heizbetrieb als auch die Aufwärmverluste im Sommerbetrieb ebenfalls grösser werden. Hingegen dürften die elektrischen Energieverbräuche der Grundwasser- und Nahwärmenetzpumpen nur unwesentlich zunehmen. Insgesamt ist also bei Vollausbau eine leichte Verbesserung der Jahresarbeitszahlen zu erwarten.

Anlage 4026

Anlagebeschreibung

Die Anlage ist in einem rein technisch orientierten Betrieb installiert und läuft seit etwas mehr als 6 Jahren einwandfrei. Die Wärmeproduktion wird für die Raumheizung und die Lüftungsanlagen samt Aussenlufterwärmung eingesetzt. Die Lüftungsanlagen laufen das ganze Jahr. Da die Anlage auf ca. 1400 m ü. M. steht wird tw. auch in den Sommermonaten Heizwärme benötigt. Die Beheizung der meist grossen Räume erfolgt vorwiegend mit den drei Lüftungsanlagen. Der Bürobereich und weitere kleinere Werkstatträume werden mit Heizkörpern, mit einer eigenen Heizgruppe beheizt.

Tab. 1: Planungsdaten

Wärmeabgabeleistungen		
• Wärmepumpen (vierstufig)	4x40	[kW]
• Elektroheizung (dreistufig)	3x90	[kW]
COP Herstellerangabe (W10W50)	3.10	
Max. Vorlauftemperatur für Heizung	50	[°C]
Kältemittel	R134a	
Anteil WP an Gesamtwärmeerzeugung	85	[%]

Situationsplan, Disposition Objekte: Situationsplan der Anlage ist nicht verfügbar.

Hydraulisches Schema der Wärmeverteilung:

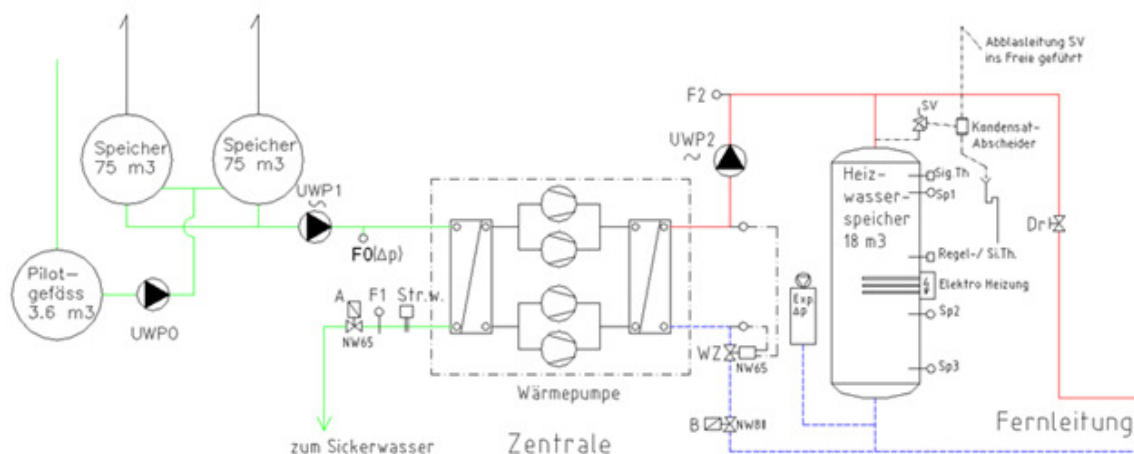


Abb. 1: Hydraulik-Schema der Wärmeerzeugung und -verteilung

Beschreibung der Wärmepumpe und der Wärmequelle

Es handelt sich um eine Wasser/Wasser-Wärmepumpenanlage, die als Wärmequelle das Kühlwasser von insgesamt vier grossen Maschinenlagerkühlungen bezieht. Dieses Kühlwasser hat über den ganzen Winter eine Temperatur von ca. +20 °C. Die Wärmepumpe ist vierstufig konzipiert und hat je einen Verdampfer und Kondensator.

Die Heizleistung wird wie folgt angegeben:

Tab. 2: Spezifikationen der Wärmepumpen (Herstellerangaben)

	Arbeitspunkt [°C]	Heizleistung [kW]	Kältemittel
Wärmepumpe	W20/W50	4x40	R134a

Das erwärmte Kühlwasser steht nur zur Verfügung, wenn mindestens eine der vier Maschinen läuft. Sonst wird die Wärmeerzeugung bivalent mit einer ohmschen Elektroheizung als zweiten Wärmeerzeuger betrieben. Die Elektroheizung läuft nur, wenn die Maschinenkühlung nicht in Betrieb ist. Dies ist seit kurzem relativ wenig der Fall. Zudem sind für das Kühlwasser, das im Betrieb in Überschuss anfällt, zwei Lagertanks (je 75'000 Liter Inhalt) vorhanden. Damit kann die Wärmeproduktion nach dem Abstellen der Maschinenkühlung deutlich ausgedehnt werden. Die Elektro-Zusatzheizung ist aus technischen Gründen eingebaut worden und läuft nur, wenn die Produktionsanlagen still stehen.

Das Kühlwasser, das beim Austritt aus dem Kühlprozess ganzjährig ca. +20 °C aufweist, wird innerhalb der Maschinen über die interne Prozesstechnik gefördert und die Temperatur via Massenstromvariation reguliert. Dabei wird das Kühlwasser ab einem Reservoir über ein Leitungssystem den vier Maschinen zugeführt. Nach dem Passieren der internen Kühlregister wird das erwärmte Kühlwasser direkt in ein „Pilotgefäß“ eingeleitet. Von dort wird es mit einer separaten Förderpumpe in die beiden isolierten Lagertanks mit total 150'000 Liter Inhalt gepumpt. Ab diesen Lagertanks wird das Kühlwasser als Wärmequelle der Wärmepumpe zugeführt.

Betriebskonzept Heizung

Das Industrieobjekt hat auf ca. 1400m ü. M. stehend eine relativ lange Heizperiode. Dabei geht die Abwärme der Maschinen direkt in die Maschinenhalle. Weiter besteht seit kurzem auch ein Wärmerückgewinnungssystem bei den Lüftungsanlagen, mit dem die Restwärme aus der Fortluft für die Vorwärmung der Aussenluft zurückgewonnen wird.

Energiebilanz + JAZ

Die vorhandenen Messeinrichtungen (Elektro- und Wärmezähler) sind auf die JAZ-Bestimmung der Wärmepumpe und die Gesamtenergiebilanz ausgerichtet.

Tab. 3: Wärmeproduktion und Energieverbrauch Anlage 4026 (nur Wärmepumpe)

	Elektroverbrauch	Wärmeproduktion	Elektro direkt	Anteil Elektro direkt	JAZ WP	JAZ gesamtanlage
2001	67220	317280	66150	0.17	4.72	2.85
2002	60182.5	275480	103230	0.27	4.58	2.29
2003	55942.5	237810	137070	0.37	4.25	1.91
2004	67950	296710	121950	0.29	4.37	2.17
2005	71577.5	301380	95400	0.24	4.21	2.35
2006	64612.5	270590	133470	0.33	4.19	2.01
2007	72290	303870	111600	0.27	4.20	2.23
2008	67460	276510	76410	0.22	4.10	2.43
Mittelwert	65904.38	284953.75	105660.00	0.27	4.33	2.28

Der elektrische Stromverbrauch für die Nebenantriebe Verteilsystem, wie Umwälzpumpen und Ventilatoren sind in den gemessenen Energiedaten nicht enthalten.

Die Wärmepumpenanlage läuft seit Anfang störungsfrei. Es wurden bisher weder Service- noch Unterhaltsarbeiten an der Wärmepumpenanlage durchgeführt. Die vier Kompressoren haben je Laufzeiten von 17'837 Stunden.

Erkenntnisse

1. Die Wärmepumpenanlage mit Wasser aus offenen Gewässern als Wärmequelle funktioniert einwandfrei, da die Wärmepumpe nur mit dem erwärmten Kühlwasser betrieben wird.
2. Mit der vierstufigen Wärmepumpe wird die Leistungsanpassung an den Bedarf optimal erreicht.
3. Der Wasserzufluss erfolgt ohne Quellen-Förderpumpe, da das Wasser aus einem Reservoir, das 30 m höher liegt, zufließt. Dadurch wird sehr viel Pumpenenergie eingespart.
4. Die JAZ der Gesamtanlage wird durch die Notwendigkeit für die Beheizung, bei Stillstand der Produktionsanlagen, bivalent eine Elektro-Zusatzheizung zu betreiben, stark verschlechtert.

Anlage 4027

Anlagebeschreibung

Die Anlage wird für die Wärmeerzeugung einer Zentrale im technischen Sektor betrieben und läuft seit 2 Jahren einwandfrei. Die Wärmeproduktion wird für die Raumheizung, die mit Lüftungsanlagen erfolgt, eingesetzt. Die Lüftungsanlagen laufen das ganze Jahr. Da die Anlage auf ca. 1700 m ü. M. steht wird tw. auch in den Sommermonaten Heizwärme benötigt.

Tab. 1: Planungsdaten

Wärmeabgabeleistungen		
• Wärmepumpen (vierstufig)	4x41.5	[kW]
COP Herstellerangabe (W10W50)	3.30	
Max. Vorlauftemperatur für Heizung	55	[°C]
Kältemittel	R404A	
Anteil WP an Gesamtwärmeerzeugung	100	[%]

Situationsplan, Disposition Objekte:

Es ist kein Situationsplan der Anlage verfügbar.

Hydraulisches Schema der Wärmeverteilung:

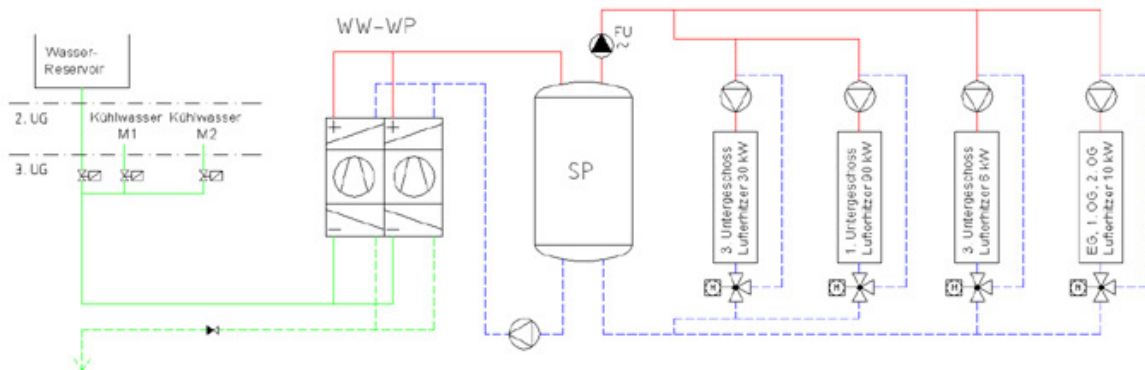


Abb.1: Hydraulik-Schema der Wärmeerzeugung und –verteilung

Beschreibung der Wärmepumpe und der Wärmequelle

Die Wasser/Wasser-Wärmepumpenanlage, die als Wärmequelle das Kühlwasser aus einem Bergsee bezieht, wird monovalent betrieben. Dieses Kühlwasser wird in einem Reservoir im Gebäude zwischengelagert. Dieses Wasser wird für die Lagerkühlungen von zwei grossen Maschinen verwendet. Das erwärmte Kühlwasser steht als Wärmequelle für die Wärmepumpe zur Verfügung.

Die Heizleistung wird wie folgt angegeben:

Tab. 2: Spezifikationen der Wärmepumpen (Herstellerangaben)

	Arbeitspunkt [°C]	Heizleistung [kW]	COP	Kältemittel
Wärmepumpe	W10/W50	4x41.5	3.3	R404A
	W10W35	4x48.5	5.1	
	W5W50	4x36.0	3.0	

Das Kühlwasser im Reservoir kann im Winter bis auf ca. 3.5-4.0 °C absinken. Wenn nun die beiden Maschinen nicht in Betrieb sind, wird dieses kalte Wasser auch als Wärmequelle benutzt. Dies bedingt bezüglich der Frostsicherung grosse Anstrengungen. Da das Wasser um ca. 2.5 K abgekühlt wird, ist

es am Austritt des Verdampfers nur noch knapp über der Frostgrenze. Man muss davon ausgehen, dass das Wasser innerhalb des Verdampfers zumindest in Teilzonen unter den Gefrierpunkt absinkt, was eine relativ grosse Gefahr hinsichtlich plötzlichen Einfrierens darstellt.

Versuche, die auf dem Prüfstand der Lieferfirma gefahren wurden, haben gezeigt, dass die Wärmepumpe mit einer Wasseraustrittstemperatur von +1.0 °C noch betrieben werden kann, obwohl die partiellen Temperaturen im Verdampfer (Wärmetauscher) mit Sicherheit unter der Gefriergrenze liegen.

Betriebskonzept Heizung

Das Industrieobjekt hat auf ca. 1700m ü. M. stehend eine lange Heizperiode. Dabei geht die Abwärme der Maschinen direkt in die Maschinenhalle. Mit der Lüftungsanlage wird diese anfallende Wärme im EG und im 1. UG direkt verteilt. Für die Lüftererneuerung wird während der Heizperiode lediglich ein kleiner Teil frische Aussenluft beigemischt. Damit kann die direkt im Raum anfallende Abwärme sehr effizient genutzt werden. Ein anderer Teil der in den beiden Maschinen anfallenden Wärme wird über die Lagerkühlung abgeführt und bei der Wärmepumpenanlage als Wärmequelle ebenfalls wieder genutzt.

Die Wärmepumpe arbeitet auf einen Wärmespeicher. Ab diesem Speicher wird die Wärme zu den Lüftungsmonoblocs verteilt, die für die Raumheizung der verschiedenen Geschosse installiert sind.

Als Wärmequelle wird, wie bereits erwähnt, Kühlwasser von drei Maschinen, resp. Geräten verwendet. Die Wassertemperatur beträgt rund 15-20 °C. Wenn jedoch alle drei Kühlwasserquellen abgestellt sind, wird das Wasser für den Wärmepumpenverdampfer direkt aus dem Kühlwasserreservoir bezogen. Da der Zufluss des Reservoirs aus einem Bergsee erfolgt, ist die Wassertemperatur im tiefen Winter mit 3.5-4.0 an der Grenze für die Verwendung als Quellentemperatur der Wärmepumpe.

Energiebilanz + JAZ

Die vorhandenen Messeinrichtungen (Elektro- und Wärmesähler) sind auf die JAZ-Bestimmung der Wärmepumpe und die Gesamtenergiebilanz ausgerichtet.

Tab. 3: Wärmeproduktion und Energieverbrauch Anlage 4027 (nur Wärmepumpe)

Heizenergie	Elektroenergie	Betriebsstunden	JAZ WP	JAZ anlage
723000	160670	4200	4.5	3.9

Der elektrische Stromverbrauch für die Nebenantriebe des Heizsystems, wie interne Umwälzpumpen bei den Monoblocs und auch die Ventilatoren sind in den gemessenen Energiedaten enthalten.

Die Wärmepumpenanlage läuft seit etwas mehr als 2 Jahren. Ein Kompressor hatte wegen einer elektrischen Störung Totalschaden erlitten.

Erkenntnisse

1. Die Wärmepumpenanlage mit Wasser aus offenen Gewässern als Wärmequelle funktioniert auch noch bei knappen Wassertemperaturen von 3.5-4.0 °C.
2. Die Massenströme müssen bei diesen knappen Wassertemperaturen sehr genau einreguliert werden, da sonst Schäden (Einfriergefahr) entstehen können.
3. Mit der vierstufigen Wärmepumpe wird die Leistungsanpassung an den Bedarf optimal erreicht.
4. Der Wasserzufluss in das Pilotgefäss erfolgt ohne Quellen-Förderpumpe, da das Wasser aus einem Reservoir, das über 20 m höher liegt, zufließt. Dadurch wird viel Pumpenenergie eingespart.

Anlage 4029

Anlagebeschreibung

Die Anlage 4029 wurde 2001 im Minergie-Standard errichtet. Die Energiebezugsfläche nach SIA 416/2 beträgt 10375 m². Es besteht nur ein Baukörper. Somit entfällt ein Nahwärmenetz. Es wird sowohl geheizt als auch (passiv mit Grundwasser) gekühlt. Berufsschule. Seit 2004 verfügt das Objekt über eine Photovoltaikanlage, die im Zeitabschnitt 2004 bis 2008 56 % des Stromverbrauchs der Wärmepumpe gedeckt hat. Es ist kein Nahwärmenetz vorhanden, da die Anlage nur ein Gebäude umfasst. Diese Anlage hat Referenzcharakter.

Tab. 1: Planungsdaten

Wärmebedarf	410'000	[kWh/a]
Wärmebedarfsleistung im Auslegepunkt (Heizung)	218	[kW]
Jahresarbeitszahl Heizung	>4.0	
Vorlauf ab Heizwärmepumpe	35 (konstant)	[°C]
Quelle (Grundwasser)	7....13	[°C]
Energiebezugsfläche	10'375	[m2]

Beschreibung der Heizanlage

Die Heizanlage besteht aus einer monovalenten Wärmepumpen-Anlage mit zwei Leistungsstufen, wobei die zweite Stufe erst unterhalb einer Umgebungstemperatur von 4°C frei gegeben wird. Die Warmwasserbereitung erfolgt komplett getrennt von der Heizanlage. Alle Nutzer sind konsequent für eine Auslegetemperatur von 35°C Vorlauf bei -10°C Aussentemperatur ausgelegt.

Die Wärmepumpen besteht aus zwei kälteseitig völlig getrennten Kreisläufen à 109 kW Heizleistung mit Schraubenkompressoren und dem Kältemittel R134a. Der COP beträgt gemäss Hersteller 5.5 bei $t_c = 37^\circ\text{C}$ und $t_o = 3.5^\circ\text{C}$. Bei Berücksichtigung der Grundwasserpumpe (4.0 kW) und der Kondensatorpumpe (0.79 kW) ergibt sich bei gleichen Bedingungen ein COP von 4.95.

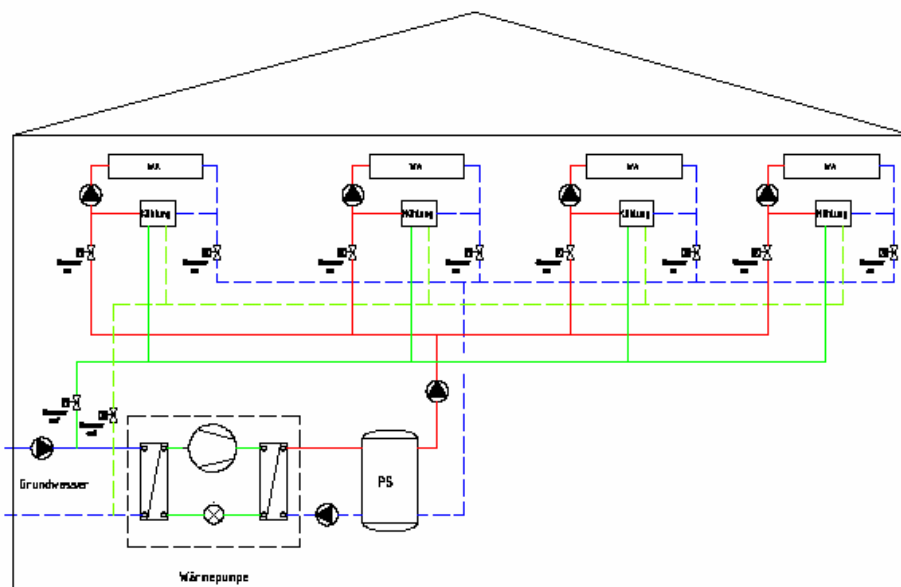


Abb. 1: Heizungsschema

Als Wärmequelle dient Grundwasser, dessen Spiegel nach Angaben des Betreibers 90 m unter Terrain liegt. Es handelt sich sehr wahrscheinlich um gespanntes Wasser, das ohne Pumpenenergie bis an die Oberfläche aufsteigt. Die Eintrittstemperatur zur WP wird mit 14°C angegeben. Wenn man die Nennleistung der Grundwasserpumpe betrachtet, so kann der Grundwasserspiegel nicht so tief liegen.

Die WP speist mehrere Gruppen, wobei der Vorlauf ab WP auf konstant 35°C gehalten wird (Rücklauf 25°C). Das aussentemperaturabhängige Gleiten der Vorlauftemperaturen erfolgt erst ab den Unterstationen.

Die Kühlung der Räume erfolgt rein passiv mittels Grundwasser.
Der Pufferspeicher hat ein Wasservolumen von 6000 Litern.

Betriebskonzept Heizung

Die Wärmeverteilung ist konsequent auf Niedertemperaturigkeit ausgelegt. Die Vorlauftemperatur beträgt ab Wärmepumpe konstant 35°C. Die einzelnen Heizgruppen führen die Vorlauftemperaturen der Heizgruppen gemäss individuellem Heizgesetz. Die zweite Wärmepumpe wird erst ab einer Umgebungstemperatur unterhalb von 4°C frei gegeben.

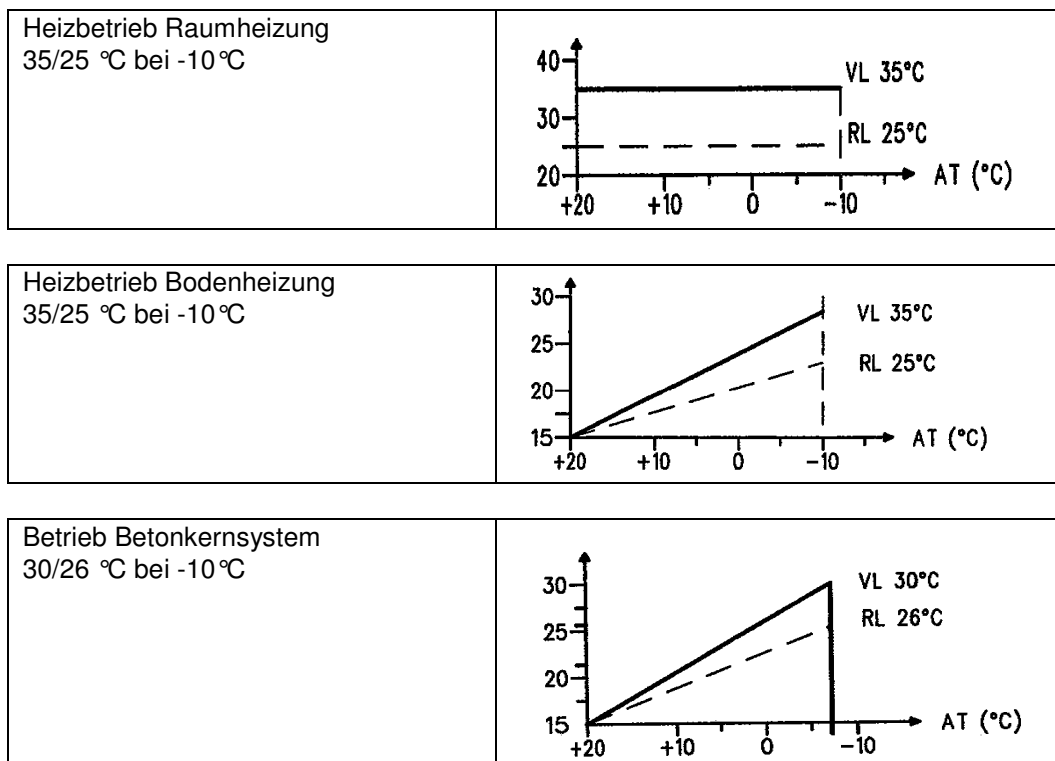


Abb. 2: Heizgesetze für die verschiedenen Heizgruppen

Wärmequelle

Als Wärmequelle für die Wärmepumpe dient Grundwasser. Die Temperatur des Grundwassers ist mit 14°C recht hoch (städtische Umgebung). Die Nennleistung der Grundwasserpumpe ist 4.0 kW. Da das Gebäude nach Minergiestandard erstellt ist, dürfte die Heizsaison recht kurz sein. Wir gehen von 6 Monaten aus. Die Laufzeit der beiden Grundwasserpumpen beträgt über die Beurteilungszeit von 8 Betriebsjahren für Pumpe 1 total 8136h und für Pumpe 2 total 8345h. Daraus errechnet sich eine Stromaufnahme der beiden Grundwasserpumpen von total ca. 66'000 kWh (ohne passive Kühlung). Somit ergibt sich pro Betriebsjahr ein mittlerer Stromkonsum von 8'240 kWh/a.

Energiebilanz + JAZ:

Die Energiebilanz der Heizanlage ist im vorliegenden Fall einfach, da weder Warmwasseraufbereitung noch Verluste im Nahwärmenetz zu berücksichtigen sind. Die Kondensatorpumpe und die Hauptpumpe werden mit zusammen 2 kW erwähnt, was eher hoch erscheint.

Tab. 3: Wärmeproduktion und Energieverbrauch Anlage 4029

Jahr	Produzierte Wärme	Elektroverbrauch	JAZ Wärmepumpe (Heizung)
	[kWh/a]	[kWh/a]	
2001/02	272490	57322	4.75
2002/03	304900	63631	4.76
2003/04	287080	59398	4.80
2004/05	255310	53220	4.83
2005/06	292020	60176	4.85
2006/07	201230	41953	4.80
2007/08	258500	54759	4.72
2008/09	246480	53439	4.61
Durchschnitt	264751	55487	4.77

In der obigen Tabelle ist der Stromkonsum für die Grundwasserpumpen nicht enthalten. Die JAZ-Werte der Tabelle sind Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpe alleine. Wenn man den mittleren Stromkonsum der beiden Grundwasser-Umwälzpumpen dazu rechnet, erhält man eine durchschnittliche Jahresarbeitszahl JAZ von 4.15. Dieser Wert ist für eine Grosswärmepumpenanlage gut.

Erkenntnisse:

1. Diese Heizanlage läuft gut. Dies rührt u.a. daher, dass die Heizgesetze aller Heizgruppen (Nutzer) identisch sind und keine Verluste in einem Nahwärmenetz auftreten. Eine kleine Optimierung würde sich ergeben, wenn auch der Vorlauf ab WP gleitend gefahren würde. Gegenüber dem konstanten Heizgesetz würde die mittlere Vorlauftemperatur im Jahresmittel auf etwa 30 °C sinken und die Jahresarbeitszahl um 12.5 % steigen (WP alleine 5.36 statt 4.76, resp. inkl. Wärmequellenpumpen 4.67 statt 4.15).
2. Der Stromverbrauch der Grundwasserpumpen ist eher hoch (ca. 15% der elektrischen Leistungsaufnahme des Kompressors). Die Dimensionierung der beiden Grundwasserpumpen könnte bei besserer Berücksichtigung des Teilleistungsbetriebs noch optimiert werden. Damit liesse sich die Effizienz der Wärmepumpenanlage im Teillastbetrieb deutlich senken.

Anlage 4030

Anlagebeschreibung

Die Anlage 4030 ist eine Schulanlage, bestehend aus einem älteren und zwei neueren Schulhäusern (Baujahr 2004). Im Sommer können die Gebäude mit passiver Kühlung klimatisiert werden (Grundwasser). Die monovalente Heizanlage (Wärmepumpen) versorgt sowohl die Heizung als auch das Warmwasser. Die Wärmeerzeuger sind in einer Zentrale zusammengefasst und versorgen die Objekte via Nahwärmenetz.

Tab. 1: Planungsdaten

Wärmebedarfsleistung im Auslegepunkt		
Heizung	345	
Warmwasser	180	[kW]
Vor-/Rücklauftemperaturen:		
Heizgruppe Bodenheizung	37/29	[°C]
Heizgruppe Heizkörper	45/39	[°C]
Heizgruppe Luftheritzer	26/20	[°C]
Warmwasserendtemperatur	55	[°C]

Situationsplan, Disposition Objekte:

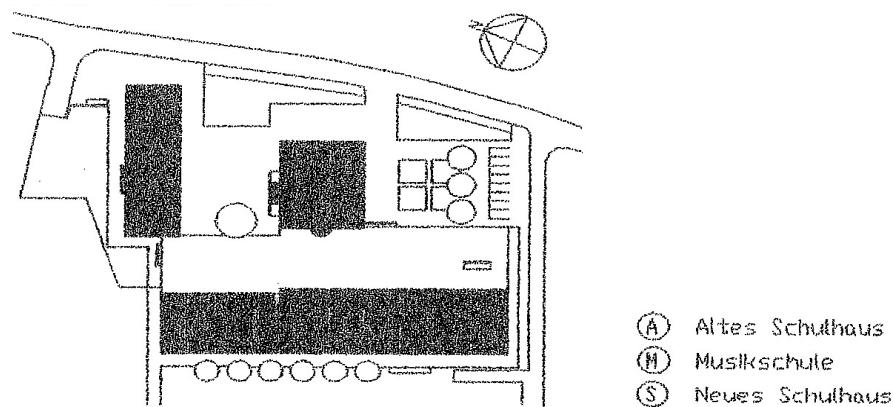


Abb. 1: Situationsplan der Überbauung

Hydraulisches Schema der Wärmeverteilung:

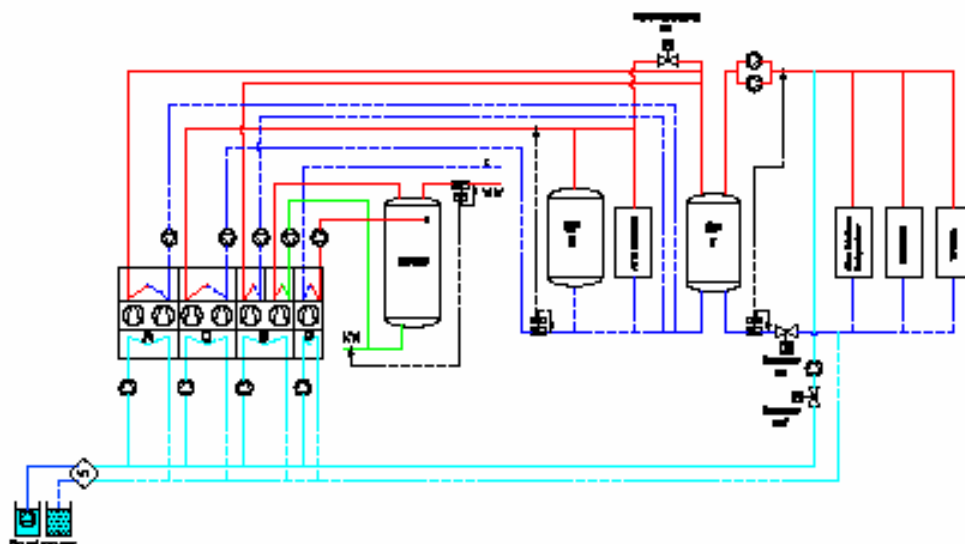


Abb. 2: Hydraulisches Schema der Wärmeerzeugung und -verteilung

Beschreibung der Wärmepumpen und der Wärmequellen

Die Wärmepumpenanlage besteht aus insgesamt 4 Wärmepumpen, wovon die Wärmepumpen A und C je zwei Leistungsstufen (2 Kompressoren) mit jeweils gemeinsamem Kondensator und Verdampfer enthalten. Die einstufige Wärmepumpe D dient ausschliesslich der Deckung der Zirkulationsverluste der Warmwasserbereitung. Wärmepumpe B hat zusätzlichen einen Heissgasenthitzer für die Erwärmung des Warmwassers. Die Wärmepumpen A, B, und C sind mit einem Unterkühler ausgerüstet, der durch das Grundwasser gekühlt wird. Die Heizwärme wird an zwei Speicher mit je 4500 Litern Inhalt abgegeben.

Die Heizleistungen werden wie folgt angegeben:

Tab. 2: Spezifikationen der Wärmepumpen (Herstellerangaben)

	Arbeitspunkt Verdampfung/ Kondensation [°C]	Arbeitspunkt Quelle/Senke [°C]	Heizleistung [kW]	Antriebsleistung [kW]	COP	Kälte- mittel
Wärmepumpe A Heizung, 2-stufig	0/42	10/40	120.0	26.6	4.50	R134a
Wärmepumpe B: Heizung (inkl. WW) Enthitzer für Warmwasser	0/42	10/40	187.6 nicht bekannt	43.2 nicht bekannt	4.34	R134a
Wärmepumpe C Heizung, 2-stufig	0/48	10/47	75.8	18.8	4.01	R134a
Wärmepumpe D (WW)	0/62	10/62	4.7	1.7	2.89	R134a
Installierte Heizleistung			388.1	90.3		

Betriebskonzept Heizung

Tab. 3: Heizkurven (gemäss Reglereinstellung):

Objekt	Vorlauf/Rücklauf bei $T_u - 10^\circ\text{C}$
Heizgruppe A	40/29
Heizgruppe B	40/29
Heizgruppe C	46/35

Wärmequelle

Als Wärmequelle für die Heizwärmepumpe dient, wie oben erwähnt, Grundwasser. Gemäss Planung beträgt die Wassereintrittstemperatur des Grundwassers 10°C und die Austrittstemperatur ca. 5°C (der WP-Hersteller gibt $8/4^\circ\text{C}$ an). Der unberührte Grundwasserspiegel liegt bei -12.6 m unter Terrain, die Unterkante Grundwasserpumpe bei -22.0 m. Die Fördermenge beträgt laut Planung $52 \text{ m}^3/\text{h}$. Zwischen Grundwasser (Quellenprimärkreis) und Wärmepumpe besteht ein Sole-Zwischenkreis (Quellensekundärkreis). Die Auslegung der Grundwasserpumpe geht von 19.8 mWS Förderhöhe und $52 \text{ m}^3/\text{h}$ Volumenstrom aus. Ihre mechanischen und elektrischen Nennleistungen betragen ca. 5500 W_{mech} resp. 7000 W. Sie ist Frequenz gesteuert.

Quellenprimär- und Quellensekundärkreis sind durch einen Trennwärmetauscher entkoppelt. Dessen Grädigkeit schätzen wir auf 3 K, was die Jahresarbeitszahl um etwa 7.5 % senkt.

Eine Abschätzung anhand der Laufzeiten der Wärmepumpen hat ergeben, dass die Grundwasserpumpe im Winter etwa 5510 Stunden und im Sommer 1900 Stunden in Betrieb ist. Wegen des konstanten geodätischen Druckunterschiedes kann die Drehzahl der Pumpe im Teillastfall nicht allzu weit abgesenkt werden. Nur der Druckabfall im Trennwärmetauscher und den Zuleitungen variiert mit der Wassermenge. Wenn nur die leistungsschwächste Wärmepumpe D arbeitet (Sommerbetrieb, 3.15 kW Kälteleistung), könnte die Wassermenge theoretisch auf etwa $0.7 \text{ m}^3/\text{h}$ abgesenkt werden. Wegen der

geodätischen Förderhöhe kann die Pumpendrehzahl jedoch nur auf 50% der Nenndrehzahl reduziert werden. Die Pumpe arbeitet hier in einem denkbar ungünstigen Arbeitspunkt, da der Durchfluss nur etwa 2% des Maximaldurchflusses bei 50% Nenndrehzahl beträgt. Der hydraulische Pumpenwirkungsgrad liegt bei etwa 4 % und der Gesamtwirkungsgrad bei etwa 3%! Die elektrische Pumpenleistung würde dadurch von 6970 W bei Volllast auf 1237 W absinken.

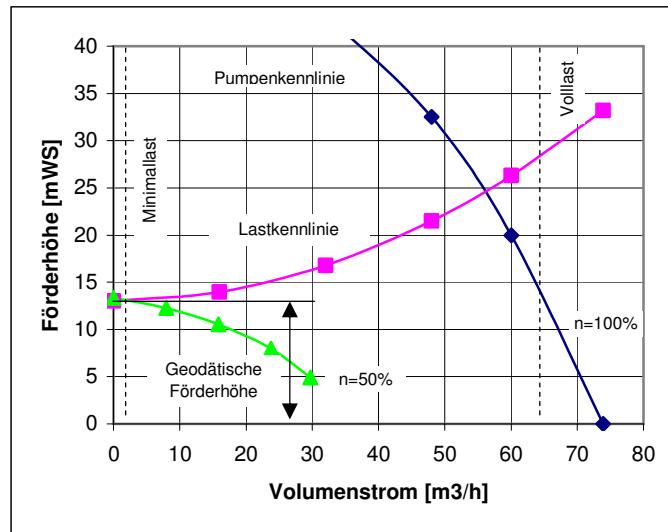
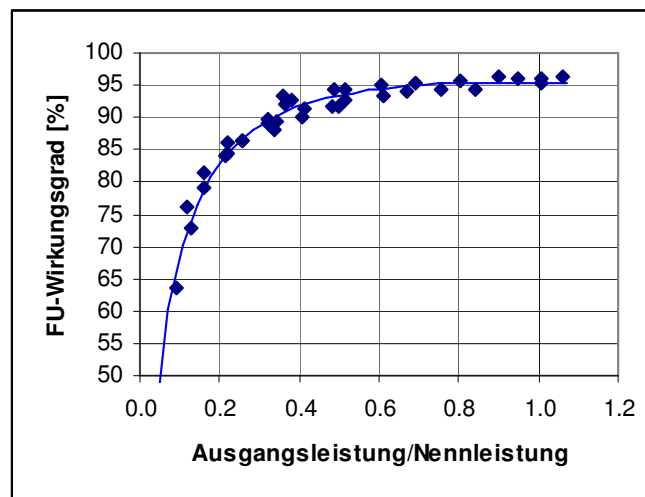


Abb. 3: Arbeitspunkt Grundwasserpumpe bei Maximal- und Minimallast

Bei dieser Betrachtung wurde u.a. berücksichtigt, dass der Wirkungsgrad des Frequenzumformers (FU) unterhalb von etwa 30% Nennlast stark abfällt. Wenn nur die Warmwasser-Wärmepumpe D aktiv ist, beträgt der Wirkungsgrad des FU etwa 76% und die elektrische Aufnahmeleistung resp. Ausgangsleistung des FU 1237 resp. 945 W. Würde man anstelle der Hauptpumpe eine kleine parallel zur Grundwasserpumpe arbeitende Grundwasserpumpe einsetzen (ohne FU), so betrüge deren elektrische Leistungsaufnahme im Mittel³³ nur etwa 60 W.



Quelle:
Danfoss

Abb. 4: Wirkungsgradverlauf eines handelsüblichen Frequenzumformers

Nicht berücksichtigt wurde mangels geeigneter Unterlagen hingegen die Reaktion des Motorenwirkungsgrades auf die Drehzahländerung. Bei tiefen Drehzahlen dürfte der Wirkungsgrad ebenfalls sinken.

Wenn alle genannten Einflüsse berücksichtigt werden, so ergibt sich zwischen dem Volumenstrom des Quellenprimärkreises und der elektrischen Leistungsaufnahme der Grundwasserpumpe inkl. FU folgender Zusammenhang:

³³ Man muss berücksichtigen, dass die Förderhöhe je nach Anzahl aktiver Wärmepumpen verschieden ist. Im zeitlichen Durchschnitt beträgt die Förderhöhe etwa 19.3 mWS.

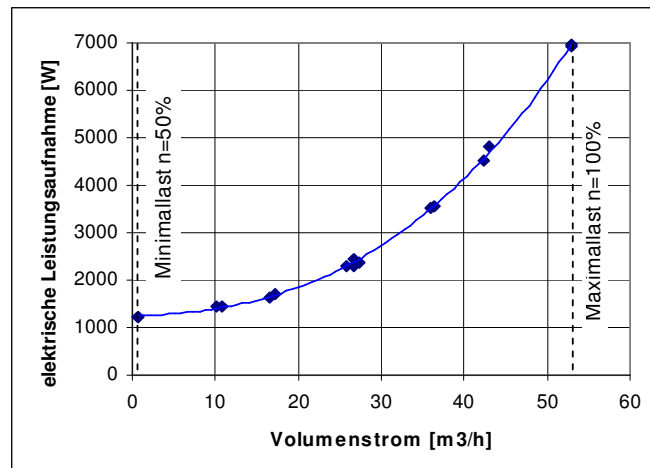


Abb. 5: Zusammenhang zwischen Volumenstrom und elektrischer Leistungsaufnahme der Grundwasserpumpe bei variabler Pumpendrehzahl

Man erkennt aus Abb. 5, dass die elektrische Leistungsaufnahme der Grundwasserpumpe nicht proportional zur geförderten Wassermenge zurückgeht. Der kleinste Massenstrom beträgt 0.7 m³/h (WP D), während der grösste Massenstrom (WP A+B+C+D) bei 52 m³/h liegt. Die zugehörigen elektrischen Leistungsaufnahmen betragen 1237 resp. 6970 W.

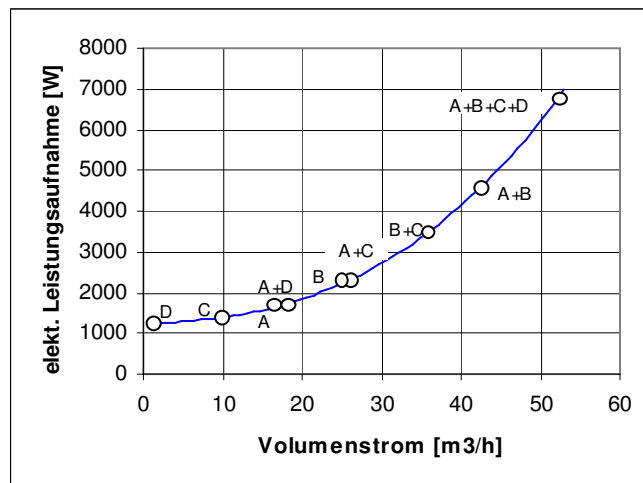


Abb. 6: Lage der Arbeitspunkte für verschiedene Kombinationen von aktiven Wärmepumpen

Würde man alternativ jeder Wärmepumpe eine eigene Grundwasserpumpe zuordnen, so würden deren elektrischer Energiebedarf etwa 38% niedriger ausfallen.

Jede Wärmepumpe bezieht ihre Quellenwärme aus dem Grundwassersekundärnetz mittels einer eigenen Verdampferpumpe. Diese Pumpen haben folgende Leistungen:

Tab. 4: Verdampferpumpen (im Nennpunkt)

Pumpe	Fördermenge [m³/h]	Förderhöhe [mWS]	Elektrische Leistungsaufnahme [W]	Laufstunden pro Jahr [h]	Elektr. Energieverbrauch pro Jahr [kWh]
WP A: TP 65-60/4	16.6	5.1	550	1740	957
WP B: TP 80-60/4	25.8	5.1	750	655	491
WP C: TP 65-60/4	10.1	5.3	550	1002	551
WP D: UPS 15-50 B130	0.6	4.4	75	4052	223
Grundwasserpumpe	52.0	13-24	945-6970	5254 ³⁴	9462
Total					11684

Die Laufzeit der Grundwasserwärmepumpe beträgt pro Jahr etwa 5254 Stunden.

³⁴ Davon 1900 h im Sommerbetrieb (nur Warmwasser)

Betriebskonzept Warmwasser

Die Warmwasserwärmepumpen arbeiten auf einen Speicher mit 2000 Liter Inhalt. Es handelt sich um einen zentralen Speicher für alle Gebäude. Die Wärmeversorgung des Warmwassers erfolgt durch die Wärmepumpe B, während die Wärmeverluste der Zirkulation durch die Wärmepumpe D mit 4.73 kW Wärmeleistung gedeckt werden.

Da der eingebaute Wärmezähler für das Warmwasser offensichtlich falsche Werte ergibt, muss der energetische Aufwand für das Warmwasser abgeschätzt werden. Die Zirkulationsverluste werden durch die Wärmepumpe D gedeckt. Bei 4052 Laufstunden pro Jahr und 4.73 kW Wärmeleistung ergibt dies 19'166 kWh.

Für die Deckung der Zirkulationsverluste ist primär die Wärmepumpe D zuständig. Die Planungs- und Auswertedaten der Warmwasserwärmepumpe D lauten wie folgt:

Tab. 5: Daten der Wärmepumpe D (Zirkulation)

	Wert	Einheiten
Kältemittel	R134a	
Verdampfungstemperatur (Hersteller)	0	[°C]
Kondensationstemperatur (Hersteller)	62	[°C]
Heizleistung (Hersteller)	4.73	[kW]
Elektrische Leistungsaufnahme (Hersteller)	1.66	[kW]
Kälteleistung (Hersteller)	3.15	[kW]
Leistungszahl (Hersteller)	2.89	
Elektrische Leistung Grundwasserpumpe	1237	[W]
El. Leistung Sekundärkreispumpe	75	[W]
Laufzeit WP D allein	2850	[h]
Laufzeit WP D mit anderen	1202	[h]
El. Leistungsaufnahme Sommer ohne Grundwasserpumpe	1735	[W]
mit Grundwasserpumpe	2972	[W]
El. Energieaufnahme Winter ohne Grundwasserpumpe	1735	[kWh/a]
mit Grundwasserpumpe	1794	[kWh/a]
Wärmeproduktion pro Jahr	19'166	[kWh/a]
JAZ WW-Zirkulation, allein	1.59	
JAZ WW-Zirkulation, mit anderen	2.64	

Die gewählte Quellenkonfiguration führt im Sommerbetrieb der Warmwasserwärmepumpe D zu sehr tiefen Jahresarbeitszahlen. Der Grundwasserpumpenanteil beträgt, wenn die WW-Wärmepumpe D zusammen mit den anderen Wärmepumpen läuft, zwischen 18 und 114 W, im Mittel 59 W.

Die Wärmepumpe B ist mit einem Heissgasenthitizer versehen, mit dem sich das Warmwasser erwärmen lässt. Der Heissgasenthitizer wird zugeschaltet, sobald das Heissgas wärmer als das Warmwasser im Speicher ist. Da kein separater Wärmezähler für den Heissgasenthitizer vorhanden ist, kann dessen Beitrag zur Warmwassererwärmung nur abgeschätzt werden. Die Heissgastemperaturen liegen mit 40°C Heizungsvorlauf etwa bei 75°C. Dadurch können von der gesamten Wärmeleistung der Wärmepumpe von 187 kW etwa 18% oder 33.7 kW für die Erwärmung des Brauchwarmwassers abgezweigt werden. Bei tieferen Vorlauftemperaturen ist es entsprechend weniger. Bei gemessenen 655 Laufstunden dieser Wärmepumpe könnten somit vom Heissgasenthitizer maximal etwa 22'074 kWh für die Warmwasserbereitung bereitgestellt werden. Dies entspricht der Erwärmung von 474 m³ Warmwasser (15->55°C) oder 1300 Litern pro Tag. Wenn man bedenkt, dass Wärmepumpe B zwei Funktionen erfüllen muss, nämlich die Warmwasseraufbereitung und die Raumwärme eines Objektes, erstaunt die kurze Laufzeit von nur 655 Stunden pro Jahr.

Im Sommerbetrieb geht die ganze von Wärmepumpe B erzeugte Wärme an das Warmwasser. Wenn man dies mitberücksichtigt, dürfte die Wärmeabgabe an das Warmwasser höher ausfallen als oben abgeschätzt.

Nahwärmenetz

Die verschiedenen Gebäude sind durch ein in Verbindungsgängen verlegtes Nahwärmenetz mit der Heizzentrale verbunden. Als Nahwärmenetz betrachten wir die Leitungen zwischen der Heizzentrale und den Unterstationen der Gebäude. Jedes Nahwärmenetz hat Wärmeverluste an die Umgebung. Zudem verbrauchen die Umwälzpumpen des Nahwärmenetzes elektrische Energie.

Für die Bestimmung der Nahwärmeverluste müsste eine Wärmemessung Seite Heizzentrale als auch Seite Unterstationen und ein Elektrozähler für die Umwälzpumpen des Nahwärmenetzes vorhanden sein. Dies ist nicht der Fall. Daher müssen wir die Nahwärmeverluste abschätzen. Die Wärmeverluste schätzen wir auf Grund der Transmissionsverluste rechnerisch ab. Ebenso die elektrische Energieaufnahme der Umwälzpumpe.

Tab. 6: Dimensionen im Nahwärmenetz 4030

Abschnitt	Länge (einfach)	Innendurch- messer	k-Wert	Volumen (doppelt)	Wärme- verlust	Wärmetrans- portleistung Heizung
	[m]	[mm]	[W/m/K]	[dm ³]	[W]	[kW]
1	32.0	100	0.58	502.7	227.5	221
2	5.0	100	0.58	78.5	35.5	174
3	90.0	65	0.85	597.3	609.2	47
Total	127.0			1178.5	872.2	

Daraus errechnet sich ein Wärmeverlust pro Jahr von 4884 kWh_{th} bei angenommenen 5600 Heizstunden. Der elektrische Energieverbrauch der Pumpe des Nahwärmenetzes errechnet sich aus den Druckverlusten und den Volumenströmen. Er beträgt 3193 kWh_{el}.

Die Wärmeverluste verursachen auch einen Temperaturabfall längs der Transportleitung. Der Vorlauf ab Kondensator müsste um diesen Temperaturabfall höher gefahren werden, um die von den Unterstationen verlangten Heizgesetze erfüllen zu können. Die Nachrechnung hat ergeben, dass sich dieser Temperaturabfall im längsten Strang um etwa 0.035 K bewegt, was einer JAZ-Verminderung von ca. 0.1 % entspricht. Wegen dieses kleinen Betrages verzichten wir auf eine Berücksichtigung dieses Temperaturabfalls.

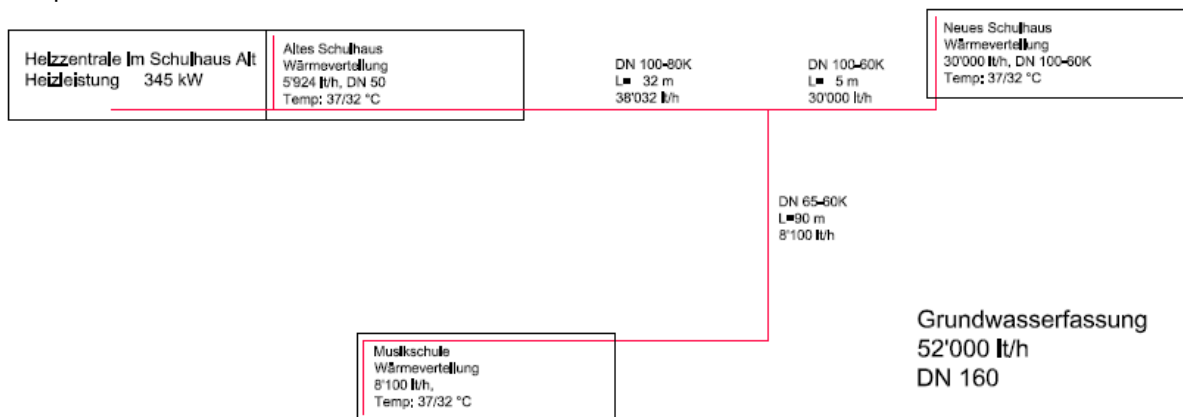


Abb. 7: Schematisch dargestellter Nahwärmenetz

Energiebilanz + JAZ

Die vorhandenen Messeinrichtungen (Elektro- und Wärmezähler) sind auf die Heizkostenabrechnung ausgerichtet. Es ist je ein Wärmezähler für das Objekt A und die Objekte B, C und D vorhanden. Der Wärmezähler für das Warmwasser zeigt falsche Ergebnisse. Der Wärmeverbrauch für das Warmwasser muss abgeschätzt werden.

Die elektrische Energieaufnahme erfolgt einerseits über einen Elektrozähler, der alle Wärmepumpen und deren systembedingten Nebenantriebe erfasst.

Für die Analyse der energetischen Situation der Anlage stehen folgende Ablesedaten zur Verfügung:

Tab. 7: Wärmeproduktion und Energieverbrauch Anlage 4030

Zeile		21.11.2008 bis 22.10.2009	Hochrechnung auf ein Jahr ³⁵	
1	Produzierte Wärme total		483'878 ³⁶	[kWh]
2	davon an Raumwärme	401'783	437'764	[kWh]
3	davon Nahwärmenetzverluste		4'884	[kWh]
4	davon an Warmwasser		22'074	[kWh]
5	davon für Zirkulationsverluste		19'156	[kWh]
6	Elektroverbrauch Heizzentrale	195'650	213'171	[kWh]
7	Elektroverbrauch Grundwasserpumpe		9'462	[kWh]
8	Elektroverbrauch total		222'633	[kWh]
9	Anteil Verdampferpumpen		2'222	[kWh]
10	Anteil Kondensatorpumpen		495	[kWh]
11	Anteil Nahwärmenetzpumpe		3'193	[kWh]
12	Anteil Kompressoren		207'261	[kWh/a]
13	JAZ Anlage (Zeile 1/Zeile 8)		2.07	
14	JAZ Wärmepumpen (Zeile 1/Zeile12)		2.33	

Die Jahresarbeitszahlen liegen deutlich unter den COP-Werten des Herstellers. Letztere berücksichtigen jedoch die Nebenantriebe nicht. In diesem Fall sind es vor allem die Grundwasserpumpe und die Verdampferpumpen. Die elektrische Nennleistung der Grundwasserpumpe wird mit 7.5 kW angegeben, diejenige der 4 Zwischenkreispumpen mit 55 bis 750 W.

Laufzeiten der Kompressoren

Auf Grund der Aufzeichnungen lassen sich folgende Laufzeiten der Wärmepumpen angeben:

Tab. 8: Laufzeiten der Wärmepumpen

	21.11.2008 bis 22.10.2009	Hochrechnung auf ein Jahr	Einheit
Wärmepumpe A	1597	1740	[h]
Wärmepumpe B	601	655	[h]
Wärmepumpe C	920	1002	[h]
Wärmepumpe D	3719	4052	[h]

Auffallend sind die grossen Unterschiede in den Laufzeiten der Wärmepumpen A, B und C, die für die Heizwärme zuständig sind. Dies deutet darauf hin, dass die Wärmelastberechnungen ungenau waren. Auffallend ist ebenfalls, dass die Wärmepumpe B die kürzesten Laufzeiten aufweist, obwohl sie auch für Warmwasseraufbereitung zuständig ist. Ebenso überrascht die Höhe der Laufzeiten der Wärmepumpen A, B und C, die als sehr tief einzustufen sind.

Da die Grundwasserpumpe immer arbeiten muss, auch wenn nur eine WP in Betrieb ist, ergeben sich hohe Laufzeiten. Es sind insgesamt 15 Kombinationen von aktiven Wärmepumpen möglich. Bei der Zuteilung der Laufstunden pro Kombination sind wir wie folgt vorgegangen. Wir haben mit der Wärmepumpe mit den geringsten Laufstunden begonnen (WP B). Wärmepumpe B tritt in 8 Kombinationen mit anderen Wärmepumpen auf. Wenn wir jeder Kombination die gleiche Wahrscheinlichkeit zuordnen, so beträgt die Laufzeit jeder Kombination 81.625 Stunden pro Jahr. Dann folgt die Wärmepumpe mit der nächst höheren Laufzeit (WP C). Wir ziehen die Laufzeiten ab, die diese Wärmepumpe in Kombination mit WP B bereits gelaufen ist. Den Restbetrag teilen wir gleichmässig auf die übrig bleibenden Kombinationen der Wärmepumpe C mit anderen Wärmepumpen, usw.

³⁵ Lineare Hochrechnung

³⁶ Zur Abschätzung: Die Multiplikation der vom Hersteller spezifizierten Wärmeleistungen der Wärmepumpen mal deren Laufzeit ergibt aufsummiert 426'730kWh/a.

Damit erhalten wir die Laufzeitentabelle aller Kombinationen:

Tab. 9: Laufzeiten der 15 Kombinationen von aktiven Wärmepumpen

Kombination	Laufzeit	Einheit
WP A	538	[h/a]
WP B	82	[h/a]
WP C	169	[h/a]
WP D (Sommer)	1500	[h/a]
WP D (Winter)	1350	[h/a]
WP A+B	82	[h/a]
WP A+C	169	[h/a]
WP A+D	538	[h/a]
WP B+C	82	[h/a]
WP B+D	82	[h/a]
WP C+D	169	[h/a]
WP A+B+C	82	[h/a]
WP A+B+D	82	[h/a]
WP A+C+D	169	[h/a]
WP B+C+D	82	[h/a]
WP A+B+C+D	82	[h/a]
Total Grundwasserpumpe	5254	[h/a]

Erkenntnisse

1. Sowohl die Wärmepumpenarbeitszahl als auch die Anlagenarbeitszahl sind sehr tief. Das Konzept der Anlage müsste eigentlich eine recht gute Arbeitszahl für die reine Wärmepumpe abgeben. Möglicherweise erfasst der Elektrozähler auch andere Verbraucher (z.B. Widerstandsheizung Warmwasser?)
2. Wenn mehrere Nutzer an der gleichen Wärmepumpe angeschlossen sind, so bestimmt die am höchsten eingestellte Heizkurve die Jahresarbeitszahl der Anlage. Wenn die Heizgesetze der Objekte unterschiedlich sind, so sollte aus Gründen der Energieeffizienz jede Heizgruppe mit einer separaten Wärmepumpe versehen sein, was hier effektiv der Fall ist.
3. Die Idee mit der Gewinnung von Wärme mittels Heissgasenthitzung für die Warmwasserzeugung ist an sich sehr gut. Damit sie allerdings einen namhaften Wärmeanteil übernehmen kann, müssten die Heissgastemperaturen hoch sein, was auch hohe Kondensationstemperaturen bedingt, wie sie etwa bei Sanierungen und Radiatorenheizung vorkommen. Mit 40°C Vorlauftemperatur ist dies eher knapp.
4. Obwohl 4 Wärmepumpen mit insgesamt 7 Leistungsstufen vorliegen, ist nur eine Grundwasserpumpe eingebaut. Diese muss immer arbeiten, auch wenn nur die kleinste WP in Betrieb ist. Eine energetisch optimale (aber teurere) Lösung würde darin bestehen, für jede WP eine eigene Grundwasserpumpe einzubauen, wobei trotzdem nur ein Grundwasserbrunnen und nur eine Grundwasserleitung notwendig wären. Insbesondere die Arbeitszahl im Sommerbetrieb der Warmwasser-Wärmepumpe wird mit dem derzeitigen Pumpenkonzept massiv verschlechtert.

Anlage 4031

Anlagebeschreibung

Die Anlage 4031 ist eine Schulanlage mit 7 Objekten. Es sind dies 4 Schulhäuser, ein Lehrschwimmbecken, eine Turnhalle und ein Verwaltungsgebäude. Alle Gebäude werden von einer zentralen Heizanlage mit Wärme für Heizung und Warmwasser versorgt. Die Wärmeerzeugung ist bivalent mit Gas/Oelheizkessel und Grundwasser-Wärmepumpe. Die Nennleistung des Gas-/Oelheizkessels beträgt 900 kW und diejenige der Wärmepumpe 264 kW. Der Brenner ist modulierend. Seit 2002 wurde der Kessel ausschliesslich mit Gas beheizt. Der Einbau der Wärmepumpe erfolgte im Jahr 2002.

Diese Anlage ist insofern bemerkenswert, als eine ausführliche Beschreibung des Regel- und Heizkonzepts vorliegt.

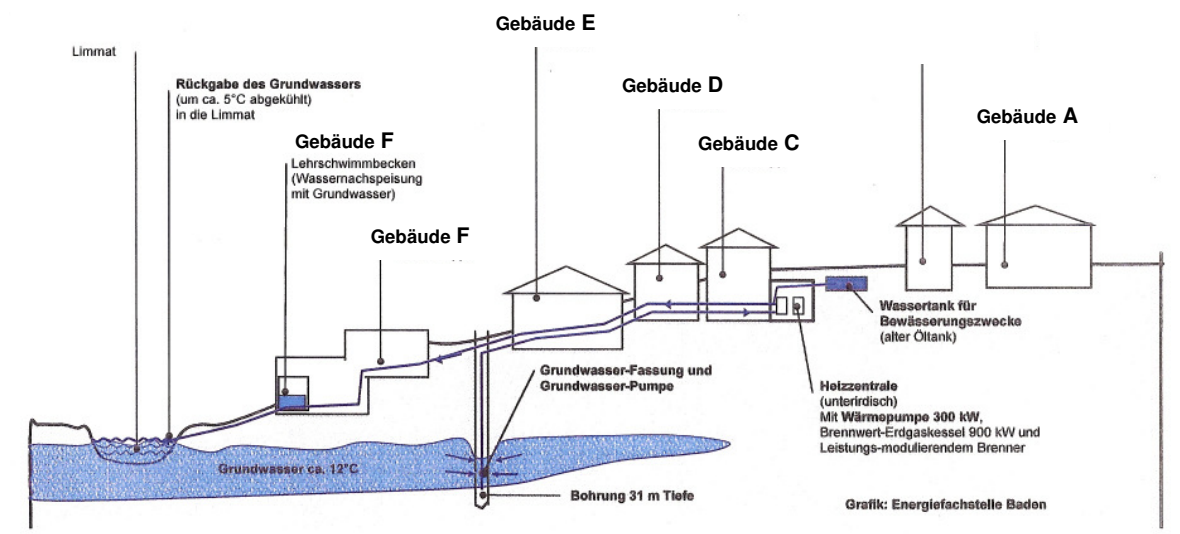


Abb. 1: Disposition der Anlage 4031

Tab. 1: Planungsdaten

Objekt	Heizung [kW]
Wärmeleistungsbedarf Auslegung	
• Gebäude A	130
• Gebäude B	110
• Gebäude C	80
• Gebäude D	25
• Gebäude E	60
• Gebäude F	725

Der Hauptvorlauf wird nach Aussentemperatur gleitend gefahren. Massgeblich ist das Heizgesetz der beiden Häuser mit den höchsten Vorlauftemperaturen.

Hydraulisches Schema der Wärmeverteilung:

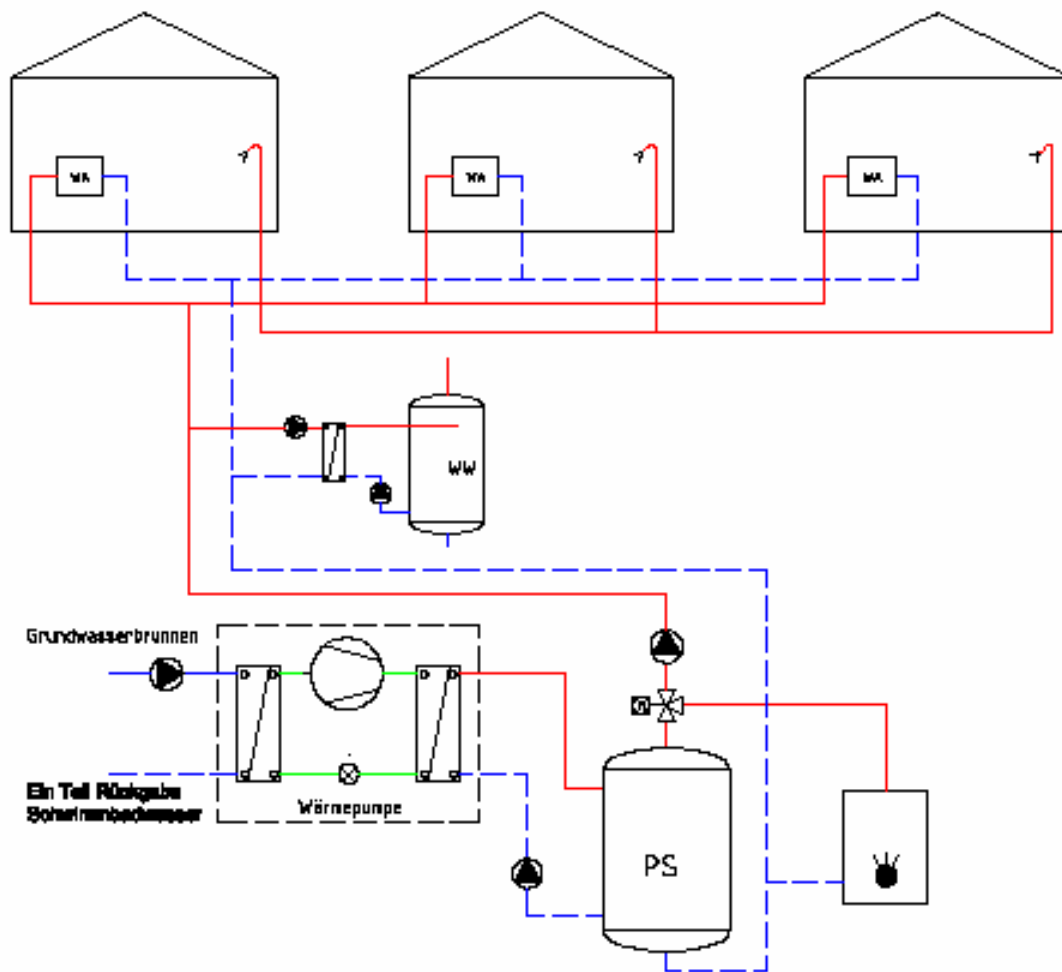


Abb. 2: Hydraulisches Schema der Wärmeerzeugung und –verteilung von Anlage 4031
(nicht alle Gebäude eingezeichnet)

Beschreibung der Wärmepumpe und der Wärmequelle

Die Wärmepumpenanlage hat zwei Schraubenkompressoren. Die Leistung kann in 6 Stufen von 19 bis 100 % eingestellt werden. Die Heizleistungen werden wie folgt angegeben:

Tab. 2: Spezifikationen der Wärmepumpen (Prüfstandmessungen)

	Arbeitspunkt [°C]	Heizleistung, gemessen [kW]	Antriebsleistung, gemessen [kW]	COP, gemessen	Kältemittel
Wärmepumpe Heizung	W12/W50	343	86.6	3.96	R134a
	W10/W50	324	85.4	3.79	R134a
	W12/W35	368	69.3	5.31	R134a
	W10/W35	349	67.3	5.19	R134a

Es werden keine näheren Angaben über die Nebenantriebe gemacht. Wir gehen davon aus, dass keine solchen im Stromverbrauch enthalten sind.

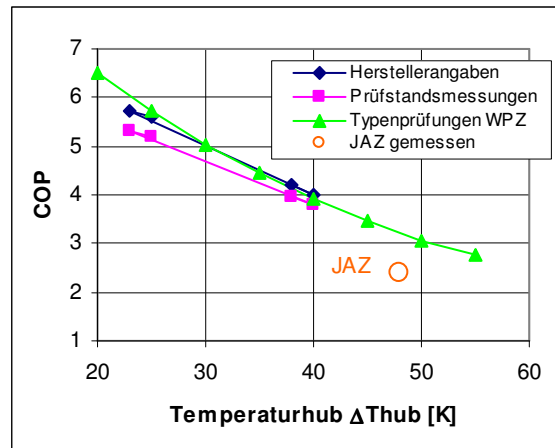


Abb. 3: COP-Verlauf der Wärmepumpe (Temperaturhub = Differenz Vorlauf-Quelle)

Die Leistungsdaten der nackten Wärmepumpe, also ohne Nebenantriebe, liegen nahe bei den Werten aus den Typenprüfungen für Kleinwärmepumpen bis 100 kW Wärmeleistung. Der ockerfarbige Kreis zeigt die gemessene durchschnittliche Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe inklusive aller Nebenantriebe. Der durchschnittliche Temperaturhub wird mit 48 K geschätzt.

Wärmequelle

Als Wärmequelle für die Wärmepumpe dient wie oben erwähnt Grundwasser von 12 °C. Der Grundwasserspiegel liegt etwa 35 m unterhalb der Wärmepumpe. Die Rückgabe des Grundwassers erfolgt an einen vorbei fließenden Fluss, der mit dem Grundwasserspiegel in Verbindung steht. Auf Grund des geodätischen Höhenunterschieds ist mit einer hohen Grundwasser-Pumpenleistung zu rechnen.

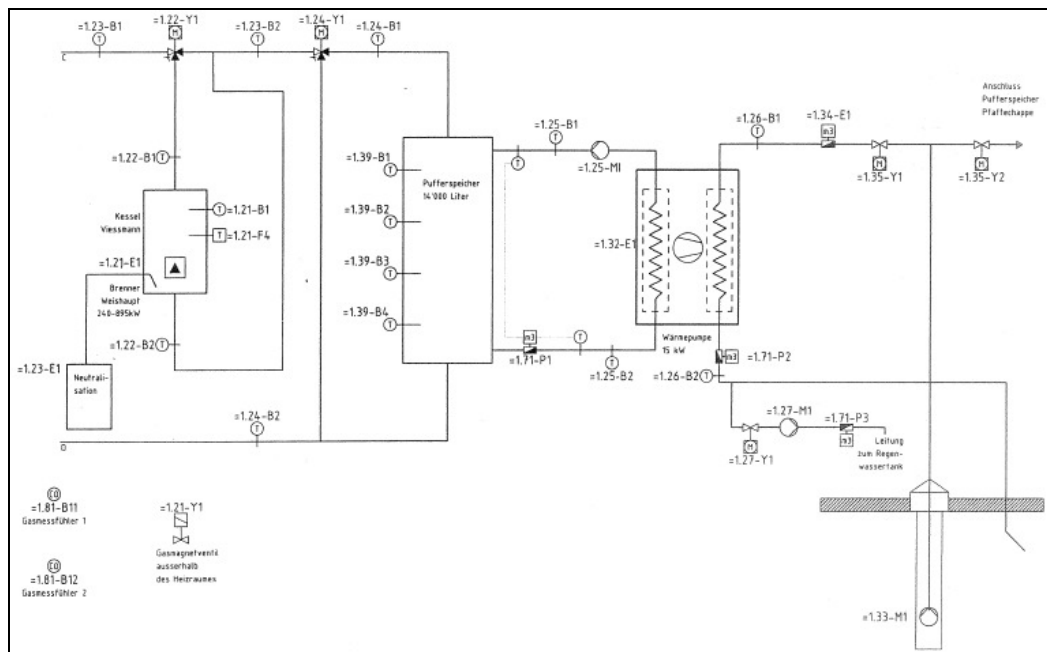


Abb. 4: Hydraulische Einbindung der Wärmepumpe

Es ist nur eine Grundwasserpumpe installiert. Diese arbeitet stets mit voller Leistung. Die Förderhöhe beträgt etwa 35 m und der Druckabfall im Verdampfer 58 kPa. Der Volumenstrom liegt 13.7 Liter pro Sekunde resp. 49.32 m³/h. Daraus errechnet sich eine Pumpenleistung von ca. 11.2 kW_{el}. Die Laufzeit der Grundwasserpumpe kann aus der Wärmeproduktion der Wärmepumpe und der Volllastleistung abgeschätzt werden. Sie beträgt pro Jahr etwa 2568 [h/a] und die Stromaufnahme 28'700 [kWh/a]. Wenn die Wärmepumpe auch im Teillastbetrieb gefahren wird, erhöhen sich die Betriebszeiten der Wärmepumpe und der Grundwasserpumpe.

Betriebskonzept Heizung

Grundsätzlich wird mit der Wärmepumpe geheizt. Die Zuschaltung des Gas-/Ölheizkessels erfolgt erst, wenn die Wärmeabgabe der Wärmepumpe nicht genügt. Die Zuschaltung des Heizkessels erfolgt dann, wenn der Hauptvorlauf ab Wärmepumpe den Sollwert gemäss Heizkurve während einer gewissen Zeit nicht erreicht. Der Sollwert der Speicherladung wird nach der Umgebungstemperatur gesteuert.

Der Hauptvorlauf und die Sekundärvorlauftemperaturen sind witterungsgesteuert nach Aussentemperatur. Da der Hauptvorlauf auch den ungünstigsten Fall berücksichtigen muss, ist er etwa identisch mit dem „höchsten“ Heizgesetz aller Gruppen.

Tab. 3: Heizkurven (gemäss Reglereinstellung):

Objekt	Vorlauf bei -10°C	Vorlauf bei +15°C	Bemerkungen
Hauptvorlauf	80	55	
Gebäude A	80	55	
Gebäude B	55	35	
Gebäude C	55	27	Bei reduziertem Betrieb werden die Vorlauftemperaturen um 8 K abgesenkt, jedoch auf mindestens 27°C gehalten.
Gebäude D	80	55	
Gebäude E	80	55	
Gebäude F	80	55	

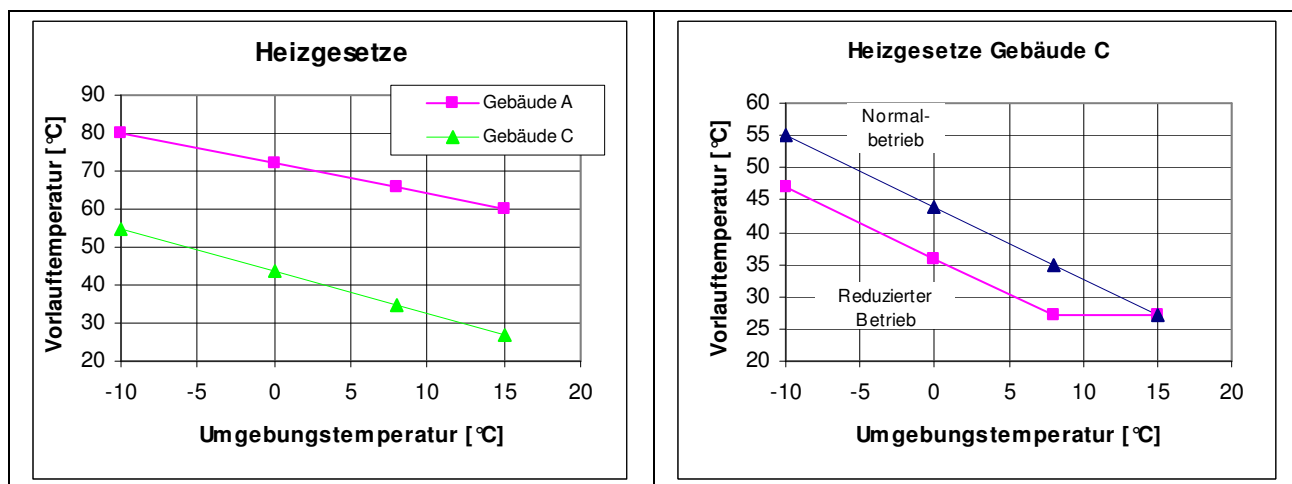


Abb. 5: Verlauf der Heizgesetze der Verbraucher

Tab. 4: Normalbetrieb und reduzierter Betrieb beim Schulhaus B

Wochentag	Normalbetrieb
Montag	04:00-22:00
Dienstag	06:00-22:00
Mittwoch	06:00-12:00
Donnerstag	06:00-22:00
Freitag	06:00-22:00
Samstag	Nur reduzierter Betrieb
Sonntag	Nur reduzierter Betrieb

Warmwasser

Das Warmwasser wird „lokal“ ab dem Nahwärmenetz erzeugt. Drei Unterstationen sind mit WW-Speichern ausgestattet, nämlich die Unterstation „Lehrschwimmbecken“, die Unterstation „Verwal-

tungsgebäude“ und die Heizzentrale selbst. Das Warmwasser wird auf 60°C erwärmt. Die Freigabe der WW-Speicherladung erfolgt ab Zeitfenster. Das Ein- und Ausschalten der Speicherladung erfolgt durch zwei Fühler im Warmwasser-Speicher, wobei der untere den Einschaltbefehl auslöst und der obere den Ausschaltbefehl. Wenn einer der drei Speicher eine Nachladung fordert, wird bei den beiden anderen Speichern eine Zwangsladung ausgelöst.

Das Aufladen der WW-Speicher erfolgt über einen Trennwärmetauscher, der primärseitig von Heizungsvorlauf gespeist wird. Die Auslegung des Trennwärmetauschers sieht eine Grädigkeit von 5 K vor.

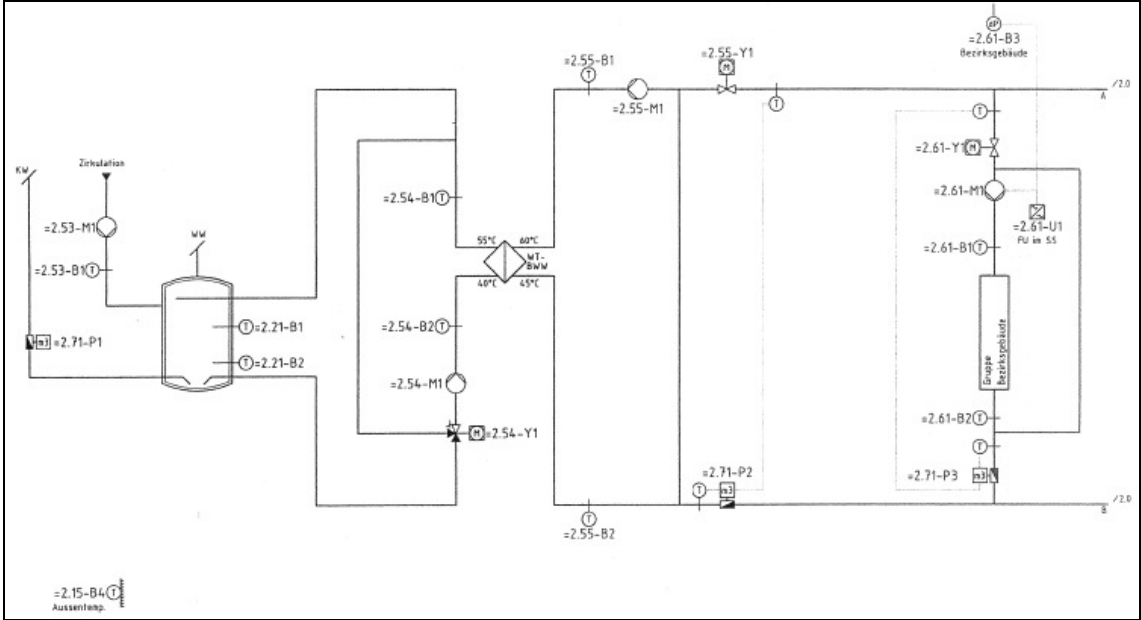


Abb. 6: Hydraulische Einbindung des WW-Speichers in der Zentrale

Im Sommerbetrieb wird das Nahwärmenetz ausschliesslich für die Warmwasserversorgung aufgeheizt. Die Wärmeerzeugung deckt im Sommer also nicht nur die Kaltwassererwärmung, sondern auch die Erwärmung des Nahwärmenetzes. Letztere geht nach dem Abstellen der Heizung ganz oder teilweise wieder verloren. Wenn wir gleiche Stillstandsintervalle unterstellen, so ergeben sich folgende Auskühlverluste des Nahwärmenetzes:

Tab. 5: Auskühlverluste im Sommerbetrieb

Aufheizvorgänge	Auskühlverlust pro Tag [kWh]	Auskühlverluste Sommerbetrieb [kWh]
einmal pro Tag	93	
zweimal pro Tag	109	
Mittelwert	101	12'423
Heizungsspeicher	12.7	1'562
Total		13'985

Da es sich um normal isolierte Gebäude handelt, rechnen wir mit 5600 Heizstunden oder 232 Heiztagen pro Jahr. Damit verbleiben 123 Tage für den reinen Sommerbetrieb.

Das Aufheizen des Nahwärmenetzes im Sommer betrifft auch den zentralen Heizungsspeicher mit 14'000 Litern Inhalt. Bei einem k-Wert von 0.4 [W/m2/K] resultiert ein Auskühlverlust von 12.7 [kWh/d] oder 1562 kWh im Sommerbetrieb.

Interessant ist in diesem Zusammenhang noch eine Gegenüberstellung der Inhalte der Warmwasserspeicher und des Nahwärmenetzes samt Heizungsspeicher:

Tab. 6: Inhalte von Nahwärmenetz, Heizungsspeicher und Warmwasserspeichern

Position	Inhalt [Liter]
Nahwärmenetz	4666
Heizungsspeicher	14000
Warmwasserspeicher Gebäude A	1000
Warmwasserspeicher Gebäude C	2000
Warmwasserspeicher Heizzentrale	1000

Tab. 6 zeigt auf, dass einem Inhalt von 4'000 Litern beim Warmwasser ein Inhalt von 18'666 Litern beim Nahwärmenetz und Heizungsspeicher gegenübersteht. Beim Aufheizen des Warmwassersystems im Sommer muss also der etwa 5.5-Fache Inhalt „bewegt“ werden.

Nahwärmenetz

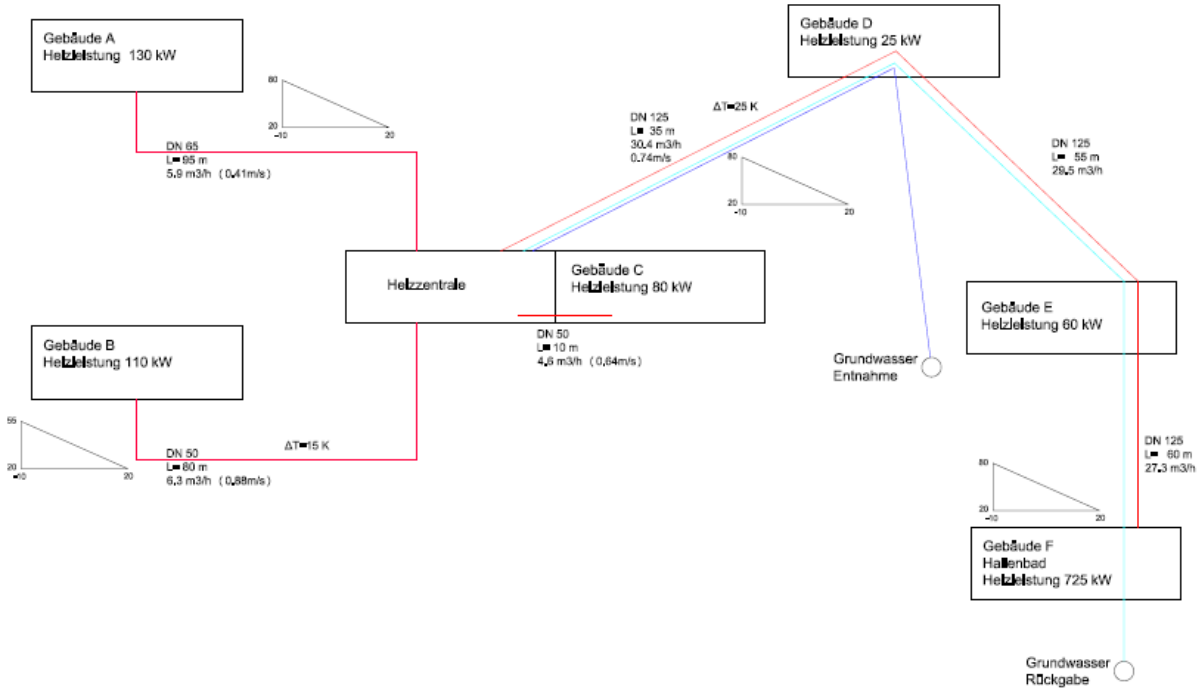


Abb. 7: Schematische Darstellung des Nahwärmenetzes

Die hohen Vorlauftemperaturen wirken sich auch nachteilig beim Nahwärmenetz aus, indem die hohe Temperaturdifferenz zum Erdboden zu höheren Wärmeverlusten führt.

Tab. 7: Wärmeverluste Nahwärmenetz

Leitungsabschnitt	Länge (einfach) [m]	Innendurchmesser [mm]	Wärmeverluste Mittel Heizsaison [W]	Wärmeverluste im Sommer [W]
1	95	65	1360	1484
2	80	50	1182	1289
3	10	50	148	161
4	35	125	658	717
5	55	125	1034	1127
6	60	125	1127	1230
Total	335		5509	6009

Auf 5600 Betriebsstunden des Nahwärmenetzes in der Heizsaison hochgerechnet ergeben sich Wärmeverluste von 30'850 kWh. Im Sommerbetrieb muss das Nahwärmenetz bei jeder Warmwasserladung hochgefahren werden. Daraus entstehen neben den Auskühlverlusten (siehe Abschnitt Warmwasser) Wärmeverluste an die Umgebung. Da die Systemtemperaturen im Sommer etwa die gleichen wie im Winter sind, entstehen analoge Wärmeverluste wie im Winter. Für die Berechnung der Wärmeverluste nehmen wir nur die Zeit, in der die dezentralen Speicher tatsächlich geladen werden, also etwa 250 Stunden. Dies entspricht Wärmeverlusten von 1502 [kWh/a]. Das Abkühlen des Nahwärmenetzes wurde bereits unter dem Kapitel Warmwasser berücksichtigt.

Die elektrische Leistungsaufnahme der Nahwärmenetzpumpe während des Heizbetriebes haben wir abgeschätzt und erhielten 3070 kWh.

Energiebilanz + Jahresarbeitszahl (JAZ)

Die Platzierung der Wärmezähler ist auf die Heizkostenabrechnung ausgerichtet. So befindet sich ein Wärmezähler am Eingang zum Gebäude A und zum Warmwasserspeicher im Gebäude A. Ein weiterer Wärmezähler befindet sich am Ausgang der Wärmepumpe vor dem Pufferspeicher.

Tab. 8: Wärmeproduktion und Stromverbrauch der Wärmepumpe in Anlage 4031

Heizperiode	Wärmeabgabe an Heizungspeicher [kWh]	Stromaufnahme [kWh]	JAZ
2002/2003	789000	323286	2.44
2003/2004	754270	357435	2.11
2004/2005	488080	190395	2.56
2005/2006	663120	274743	2.41
2006/2007	706480	281232	2.51
Mittel	680190	285418	2.41

In der Stromaufnahme ist die Grundwasserpumpe enthalten. Nach unseren Abschätzungen verbraucht diese Pumpe durchschnittlich etwa 28'710 [kWh/a] oder 11 % des Stromverbrauchs des Kompressors. Die JAZ liegt tief. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die Vorlauftemperaturen ab Kondensator der Wärmepumpe infolge des hoch liegenden Heizgesetzes des Hauptvorlaufs vermutlich im Jahresmittel bei etwa 60°C liegen. Dies entspricht einem durchschnittlichen Temperaturhub von 48°C. Gemäss Abb. 3 (Seite 84) ergäbe dies ein COP resp. JAZ von etwa 3.2. Berücksichtigt man noch die etwa 11 % Stromverbrauch der Grundwasserpumpe, so wäre eine JAZ von etwa 2.9 zu erwarten. Die Differenz zu den effektiv gemessenen Werten der JAZ kann teilweise durch die Anfah- und Abstellverluste erklärt werden (aber nicht vollständig). Weitere Ursachen könnten der Teillastbetrieb sein (sofern er gefahren wird).

Tab. 9: Aufschlüsselung des Wärmeverbrauchs und des Stromkonsums (Die Nahwärmeverluste werden nur zur Hälfte angerechnet, da die Wärmepumpen ebenfalls nur 50% des Wärmebedarfs decken.

Zeile		Mittelwert 2002/2007	
1	Produzierte Wärme WP, total	680'190	[kWh/a]
2	davon an Raumwärme+Warmwasser	657'004	[kWh/a]
3	davon Nahwärmenetzverluste	23'186	[kWh/a]
6	Elektroverbrauch, total	285'418	[kWh/a]
7	Anteil Grundwasserpumpe	28'710	[kWh/a]
8	Anteil Nahwärmenetzpumpe	3'080	[kWh/a]
9	Anteil Kompressoren	253'628	[kWh/a]
13	JAZ Anlage (Zeile 1/Zeile 6)	2.30	
14	JAZ Wärmepumpen (Zeile 1/Zeile 9)	2.68	

Da es sich um eine bivalente Anlage handelt, interessiert auch die Aufteilung der Wärmeproduktion auf den Heizkessel und die Wärmepumpe.

Tab. 10: Aufteilung der Wärmeproduktion auf Heizkessel und Wärmepumpe

Heizperiode	Wärme Kessel [kWh/a]	Wärme WP [kWh/a]	Wärme total [kWh]	Anteil WP [%]
2002/2003	809852	789000	1598852	49
2003/2004	905415	754270	1659685	45
2004/2005	1276028	488080	1764108	28
2005/2006	1024454	663120	1687574	39
2006/2007	725840	706480	1432320	49
Mittelwert	948318	680190	1628508	42

Man kann aus diesen Zahlen die Wärmebedarfsleistung im Auslegungspunkt näherungsweise berechnen und erhält 582 [kW]. Die Auslegeleistung der Wärmepumpe liegt bei etwa 46 % der gesamten Wärmebedarfsleistung. Dies ist ein eher tiefer Wert. Wir hätten einen Wert in der Gegend von 60% erwartet. Die Gründe dürften einerseits in den recht langen Perioden mit reduziertem Wärmebedarf mit anschliessendem grossen Wärmebedarf zur Wiederaufheizung (siehe Tab. 4) und andererseits in den recht hohen Vorlauftemperaturen liegen.

Bei bivalenten Anlagen besteht immer die Gefahr, dass die Rücklauftemperaturen zu hoch liegen, womit sich die Wärmepumpe aus Gründen des Maschinenschutzes abschaltet und die ganze Wärmeproduktion dem Heizkessel überlässt. Im vorliegenden Fall werden Verbrauchergruppen mit sehr unterschiedlichen Vorlaufregimen gespeist. Der Wärmeanteil der beiden Verbraucher mit 80°C Auslegungsvorlauf beansprucht zusammen jedoch nur etwa 16% der Gesamtwärme. Damit dürfte der Rücklauf vor allem durch die Rücklauftemperaturen der anderen, mit niedrigeren Temperaturen arbeitenden Gruppen dominiert werden. Die Rücklauftemperaturen bewegen sich also in einem Bereich, bei dem die Wärmepumpe auch am kältesten Tag noch arbeiten kann. Allerdings muss dann der Heizkessel die Temperaturerhöhung auf die grösste verlangte Vorlauftemperatur vornehmen, was mit einem erheblichen Wärmeanteil erkauft wird. Der Anteil der Wärmepumpe sinkt somit.

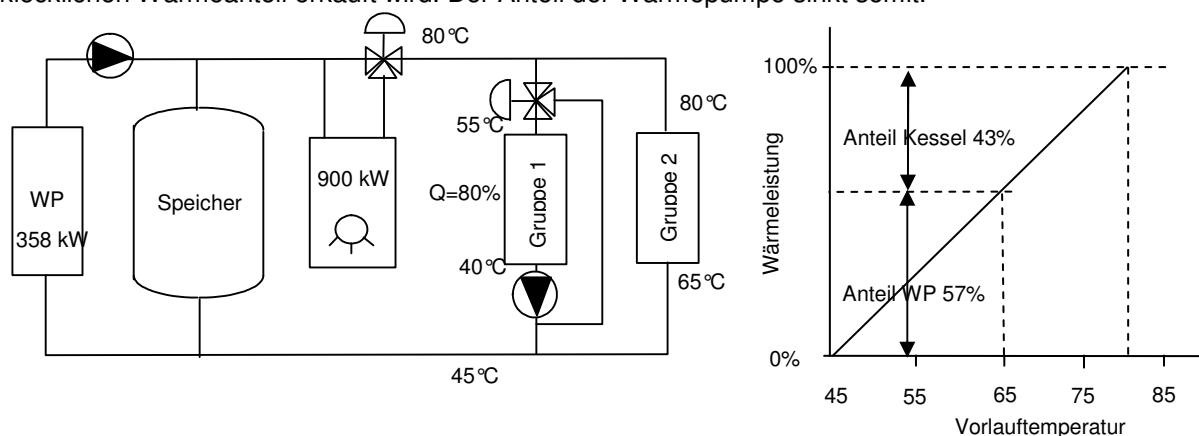


Abb. 8: Wärmeanteile von Kessel und Wärmepumpe (Beispiel)

Es wird unterstellt, dass der Temperaturhub der Wärmepumpe geregelt werden kann und bis zu 16 K beträgt. Bei ungeregeltem Temperaturhub von 10 K ändern sich die Verhältnisse zu Ungunsten der Wärmepumpe. In diesem Fall beträgt der Leistungsanteil der Wärmepumpe im Auslegungsfall nur 29 %. Bei einer Vorlauftemperatur von 60°C und einer Rücklauftemperatur von 31.5 °C betragen die Leistungsanteile der Wärmepumpe 100 % resp. 35% bei nur 10 K Hub. Hier zeigt es sich klar, dass eine Mengensteuerung des Senkenmassenstroms im Kondensator den Anteil der Wärmepumpe deutlich erhöhen kann. Die effektiv gemessenen Wärmeproduktionsanteile der Wärmepumpe liegen je nach Jahr zwischen 28 und 49 %. Bei hohen Leistungsanforderungen kann der Leistungsanteil der Wärmepumpe zusätzlich durch die maximale Wärmeabgabe der Wärmepumpe beschränkt sein (358 kW von total 1258 kW = 28%).

Erkenntnisse

1. Wenn Verbrauchergruppen mit sehr unterschiedlichen Heizgesetzen zentral versorgt werden, so muss das Heizgesetz des Hauptvorlaufs dem höchsten Heizgesetz angepasst sein, was für die Wärmepumpe ungünstig ist. Im vorliegenden Fall wäre es sinnvoll, den Heizkessel nur auf jenen Strang wirken zu lassen, der die hohe Vorlauftemperatur benötigt. Alternativ könnten dezentrale Heizkessel eingesetzt werden. Wenn die niedertemperaturigen Heizgruppen mit dezentralen Wärmepumpen gespeist würden, könnten die Vorlauftemperaturen dort im Jahresmittel um etwa 20 K gesenkt werden. Dies würde die Jahresarbeitszahlen bei diesen Gruppen um etwa 40-50% erhöhen.
2. Bei einer bivalenten Heizanlage besteht bei tiefen Aussentemperaturen die Gefahr, dass sich die Wärmepumpe wegen zu hoher Rücklauftemperaturen abschaltet. Im vorliegenden Fall ist es jedoch so, dass die Rücklauftemperatur trotz des hohen Vorlaufs relativ niedrig liegt, da die niedertemperaturigen Heizgruppen dominieren.
3. Das Nahwärmenetz hat wegen der hohen Vorlauftemperaturen hohe Wärmeverluste.
4. Bei einer solchen Anlage wäre es aus energetischen Gründen sinnvoller, dezentrale Wärmepumpen vorzusehen und eine kalte Verteilung der Quellenwärme vorzunehmen. Damit können einerseits die Nahwärmeverluste vermieden werden und andererseits die optimalen Vorlauftemperaturen für die Wärmepumpe gefahren werden.

Anlage 4032

Anlagebeschreibung

Die Analyse dieser Anlage basiert auf Angaben und Aussagen des Betreibers, auf webbasierten Anlagendaten und auf einem BFE-Bericht des Betreibers [3].

Die Anlage 4032 ist eine Schulanlage, bestehend aus einem Schulhaus, 2 Abwartwohnungen und zwei Turnhallen. Das Schulhaus stammt aus dem Jahr 1906. Im Jahr 2006 wurde eine Propanwärmepumpe eingebaut. Raumwärme und Warmwasseraufbereitung werden durch eine bivalente Heizanlage, bestehend aus einer Wärmepumpe mit drei Leistungsstufen und einem Gaskessel, erzeugt.

Tab. 1: Planungsdaten

Wärmebedarf total (10 Mte)	772.9	[MWh/a]
davon Wärmepumpe	718.8	
davon Gasheizkessel	54.1	
Strombezug (10 Mte)	268.2	[MWh]
Wärmebedarfsleistung im Auslegungspunkt ([3], S. 9)		
Heizung	446	[kW]
Warmwasser	140	
Jahresarbeitszahl Heizung	3.5	[-]
Jahresarbeitszahl Warmwasser	3.1	[-]
Vorlauf ab Heizwärmepumpe	75	[°C]

Gemäss Planung wurde eine Jahresarbeitszahl von 3.5 für die Heizung und von 3.1 für die Warmwasseraufbereitung angenommen ([3], S. 16).

Situationsplan, Disposition Objekte: Nicht vorhanden.

Hydraulisches Schema der Wärmeverteilung:

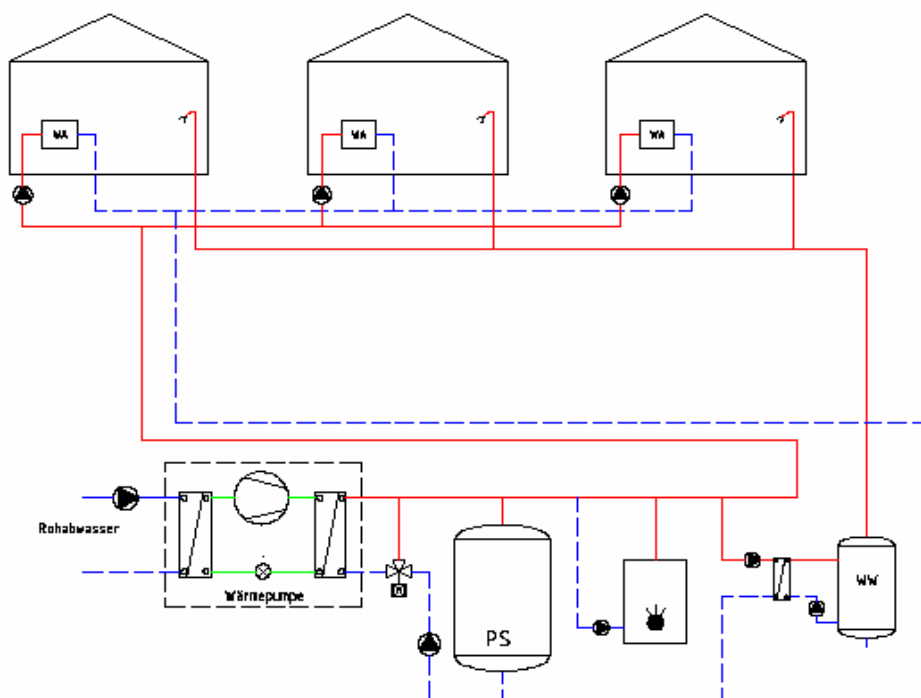


Abb. 1: Schema der Hydraulik der Heizanlage im Objekt 4032

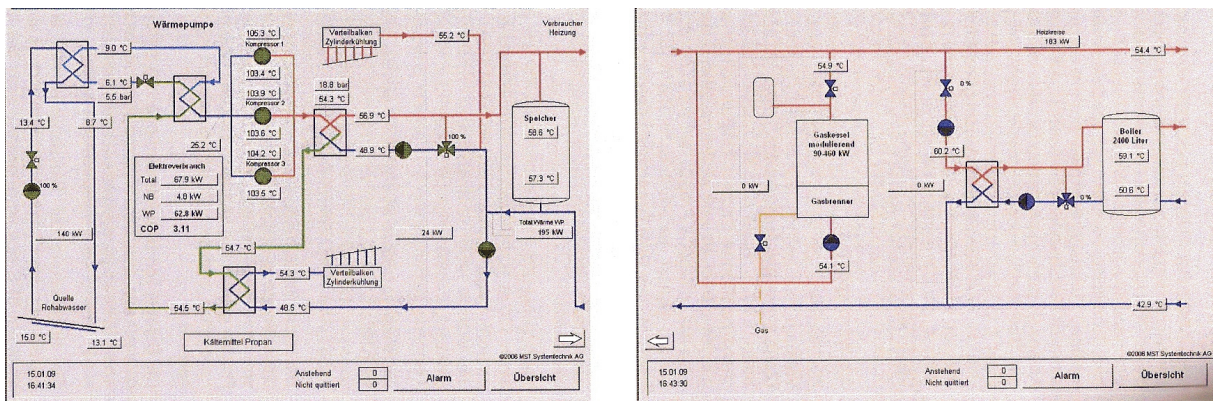


Abb. 2: Hydraulisches Schema der Wärmeverteilung

Beschreibung der Wärmepumpen und der Wärmequellen

Die Wärmepumpenanlage besteht aus einer zentralen, dreistufigen Heizwärmepumpe für alle Gebäude. Das Warmwasser wird ebenfalls zentral erzeugt. Als Wärmequelle wird ungereinigtes Abwasser genutzt. Die Kompressoren sind Hubkolbenmaschinen mit wassergekühlten Zylinderköpfen. Die abgeführte Wärme wird dem Rücklauf zugeführt. Als Kältemittel wird Propan eingesetzt. Der Gaskessel ist seriell in den Vorlauf der Wärmeverteilung eingebunden. Die Heizleistungen werden wie folgt angegeben:

Tab. 2: Spezifikationen der Wärmepumpen (Herstellerangaben)

Wärmepumpe Heizung	Arbeitspunkt Verd./Kond. [°C]	Arbeitspunkt Quelle/Senke [°C]	Heizleistung [kW]	Antriebsleistung [kW]	COP
1. Stufe	7/65	14/62	96.8	23.1	4.2
2. Stufe	7/65	14/62	193.6	46.2	4.2
3. Stufe	7/65	14/62	290.4	69.3	4.2
Gemessen		14/62			2.68

Die 3 Kompressoren arbeiten je auf einen gemeinsamen Verdampfer und Kondensator. Es ist daher anzunehmen, dass die Temperaturabstände in Verdampfer und Kondensator mit zunehmender Zahl aktiver Kompressoren ansteigt und im Gegenzug die COP sinken. Leider gibt es keine Herstellerangaben dazu. Daher wurden die Leistungsdaten in Tab. 2 proportional zu den Stufen gerechnet.

Auf der Senkenseite zeigen die Messungen eine um 3 K höhere Vorlauftemperatur als die Kondensationstemperatur. Dies ist erstaunlich. Die Temperaturspreizung auf der Wasserseite beträgt etwa 8 K. Damit ist eine derartige Überhöhung der Vorlauftemperatur kaum möglich. Aus den Messdaten ist auch ersichtlich, dass die Flüssigkeitstemperatur nach dem Kondensator höher als die Kondensationstemperatur ist. Da liegt der Verdacht nahe, dass die Kondensationstemperatur auf Basis des Kondensationsüberdrucks ermittelt und somit etwa 2 K zu tief ausgewiesen wird. Sie müsste höher liegen, womit auch die oben erwähnte, gegenüber der Kondensationstemperatur um 3 K höhere Vorlauftemperatur relativiert würde.

Wärmequelle

Als Wärmequelle für die Wärmepumpe dient, wie oben erwähnt, ungereinigtes Abwasser. Die Abwassertemperatur variiert zwischen 6.3 und 21.5°C mit einem Mittelwert bei 14.35 °C (in [1] 13.8 °C). Für die Abkühlung des Abwassers sind gemäss Messung 2.3 K einzusetzen. Der Zwischenkreis liegt im Mittel um etwa 2.1 K tiefer. Die Grädigkeit beträgt somit etwa 2.1 K. Die Verdampfungstemperatur liegt um etwa 7.2 K unter der Abwassertemperatur.

Die elektrische Energieaufnahme der Zwischenkreispumpe wird nicht angegeben. Hingegen ist die Summe der elektrischen Leistungsaufnahmen aller Nebenantriebe messtechnisch erfasst. Diese liegt

zwischen 4 und 4.8 kW. Neben der Zwischenkreispumpe sind noch die Umwälzpumpe des Hauptvorlaufs und 12 Speisepumpen für die 12 Heizgruppen und den Warmwasserspeicher vorhanden. Aus den Unterlagen geht nicht hervor, ob der Elektrozähler für die Nebenantriebe nur die Zwischenkreispumpe oder auch die 14 UP der Heizgruppen und Warmwasseraufbereitung erfasst. Da sich die Heizgruppenpumpen in verschiedenen Gebäuden befinden, ist anzunehmen, dass diese nicht vom zentralen Elektrozähler für die Nebenantriebe erfasst werden. Wir gehen deshalb davon aus, dass vom Elektrozähler der Nebenantriebe nur die Zwischenkreispumpe und allenfalls die Hauptvorlaufpumpe erfasst werden.

Laut [3] beträgt die mittlere Leistungsaufnahme der Nebenaggregate 4.6 kW. Wir schätzen, dass 4.4 kW an die Zwischenkreispumpe und 0.2 kW an die Hauptvorlaufpumpe gehen.

Leistungszahlverläufe

Die Leistungszahlverläufe können auf Grund der Messungen erstellt werden und zeigen sich wie folgt:

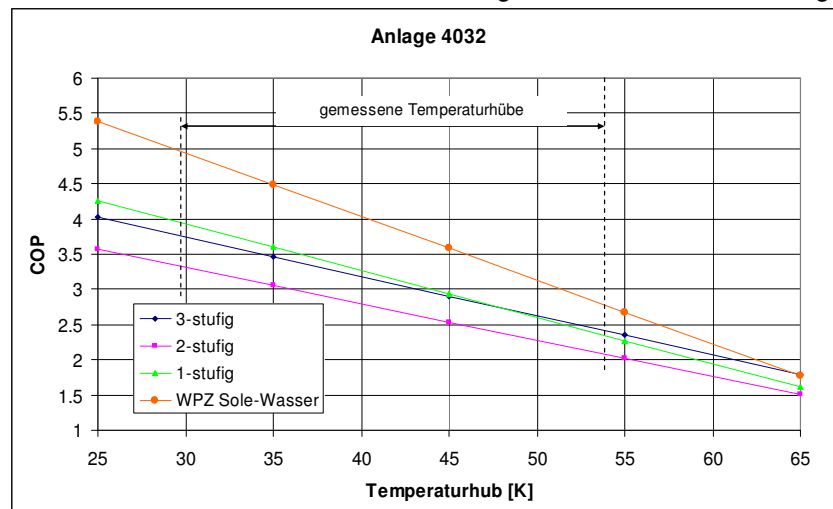


Abb. 3: Verlauf der Leistungszahl der Wärmepumpe für die drei Leistungsstufen.

Der Temperaturhub ist definitionsgemäss die Differenz von Vorlauf- und Quelltemperatur.

Auffallend ist der gegenüber den Leistungsstufen 1 und 3 deutlich tiefer liegende Verlauf der Stufe 2. Wir hätten diese Abweichung eher für die erste Stufe erwartet. Hier ist zu beachten, dass wir nur sehr wenige Stützpunkte für die Approximation der Kurve haben. Es kann aber auch mit dem Betriebskonzept der Nebenaggregate zusammenhängen. Zum Vergleich wurden die am Wärmepumpentestzentrum gemessenen Verläufe für Sole-Wasser-Maschinen eingetragen. Es ist anzumerken, dass bei den Typenprüfungen gemäss EN 14511 die Energieaufnahme der Nebenaggregate nur sehr schwach berücksichtigt wird. Die im Betrieb auftretenden Temperaturhübe liegen zwischen 29.2 °C und 53.8 °C, die Vorlauftemperaturen ab Wärmepumpe zwischen 43.3 °C und 66.6 °C.

Die Betriebsanteile der drei Leistungsstufen sind sehr unterschiedlich, wie Abb. 4 zeigt. Erstaunlich ist der geringe Anteil der beiden unteren Leistungsstufen.

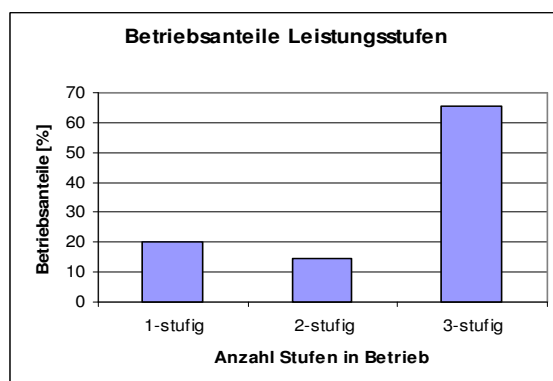


Abb. 4: Betriebsanteile der drei Leistungsstufen

Betriebskonzept Heizung

Typisch für die Situation der Wärmepumpe sind die sehr unterschiedlichen Bedürfnisse bezüglich der Vorlauftemperaturen [3]. Es werden regelungstechnisch 12 Gruppen unterschieden, die alle unterschiedliche Vorlauftemperatur im Auslegungspunkt haben.

Tab. 3: Heizkurven (gemäss Reglereinstellung): (aus Abb. 6 in [3])

	Nutzergruppe	Vorlauf bei -10 °C	Vorlauf bei +15 °C	Einheit
1	WW-Boiler	60	60	[°C]
2	Bodenheizung Bibliothek	50	30	[°C]
3	Treppenhäuser	70	33	[°C]
4	Turnhalle L-Strasse	44	27	[°C]
5	Turnhalle A-Strasse	45	29	[°C]
6	Schulräume C	58	30	[°C]
7	Schulräume A	63	37	[°C]
8	Schulräume B	58	33	[°C]
9	Baderäume A-Strasse	50	30	[°C]
10	Baderäume L-Strasse	50	29	[°C]
11	Abwart A-Strasse	58	20	[°C]
12	Abwart L-Strasse	75	43	[°C]

Die Wärmepumpe muss zur Befriedigung der Komfortbedürfnisse in allen Gruppen auf der höchsten benötigten Vorlauftemperatur gefahren werden. Es ist dies die Position 12 (Abwartwohnung L-Strasse). Die Heizgesetze der einzelnen Gruppen haben teilweise einen ungewohnten Verlauf, indem diese „nach unten durchgebogen“ sind. Alle Gruppen werden mit Nachtabsenkung gefahren. Diese Betriebsweise birgt die Gefahr, dass beim morgendlichen Aufheizen die Wärmepumpe temperaturmässig überfordert wird und der Gaskessel die Hauptlast tragen muss.

In [3], S. 14 wird der Verlauf des Wärmebedarfs der Heizung (ohne Brauchwarmwasser) mit der Gleichung:

$$\dot{Q}_{\text{Heiz}} = 4700 - 226.4 \cdot \bar{T}_u \quad [\text{kWh/d}] \quad (1)$$

angegeben. Der auf 24 Stunden umgelegte Wärmebedarf für das Warmwasser beträgt 204 [kWh/d].

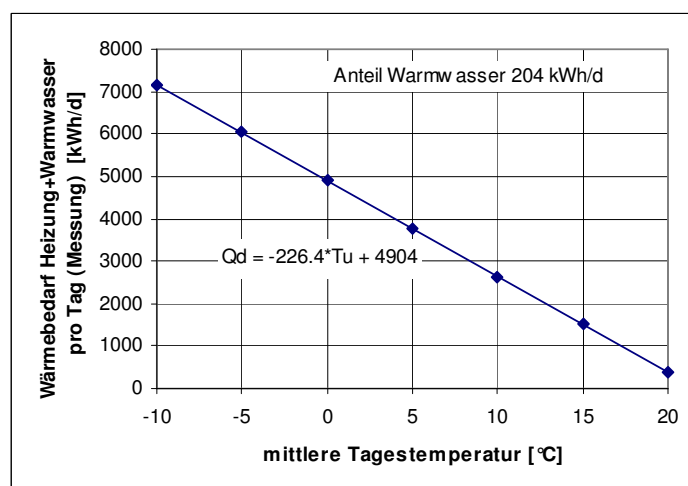


Abb. 5: Wärmebedarfsverlauf für Heizung und Warmwasser gemäss Messung [3]

Der Wärmebedarf für die Heizung und Warmwasser liegt im Auslegungspunkt deutlich unter dem planerisch vorgesehenen Wert von 772.9 [kW] resp. 18'550 [kWh/d] (siehe Tab. 1). Theoretisch müsste die Wärmepumpe den Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser allein decken können.

In [1] (Seite 20) wird auf die grosse Differenz zwischen der produzierten Wärmemenge und der Wärmeabgabe an die Heizung resp. das Brauchwarmwasser hingewiesen. Die Differenz wird für die Heizperiode vom 1.4.08 bis 21.1.09 mit 24.7 % angegeben.

Wir haben alternativ die Jahresarbeitszahl durch Simulation berechnet und erhielten einen Wert von 2.71. Dabei haben wir den Klimaverlauf von Zürich-Kloten, den Temperaturhub nach Abb. 6 und den COP-Verlauf von Abb. 4 (3-stufig) unterlegt. Dieser eher niedrige Wert resultiert hauptsächlich aus den relativ hohen Temperaturhuben.

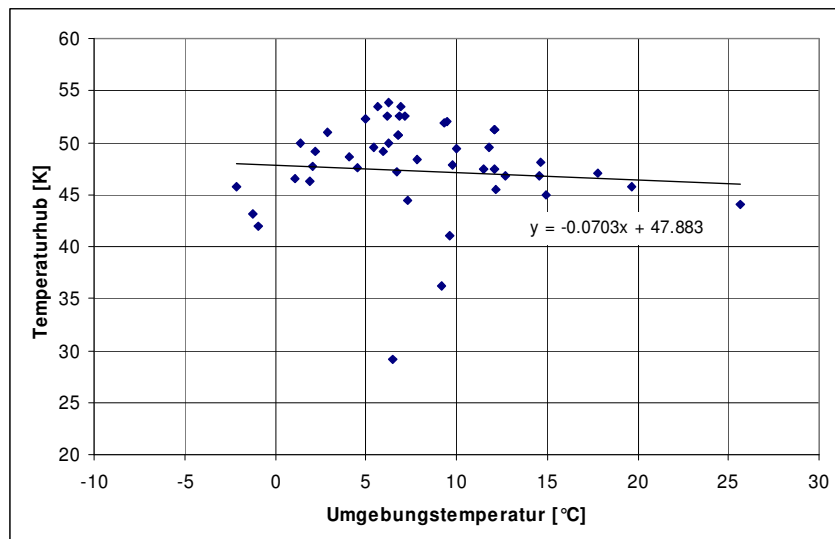


Abb. 6: Verlauf des gemessenen Temperaturhub's in Funktion der Umgebungstemperatur

Warmwasserbereitung

Die Warmwassererzeugung erfolgt ebenfalls zentral ab Vorlauf Heizung nach dem Gaskessel über einen aussen liegenden Wärmetauscher. Es ist ein zentraler WW-Speicher mit 2400 Litern Inhalt eingebaut. Das Warmwasser wird auf 60 °C erwärmt. Gemäss Auswertungen ([3], S. 20) beträgt der Wärmebedarf der Warmwasseraufbereitung auf ein Jahr in der Messperiode vom 1.4.08 bis 21.1.09 (295 Tage) 60.3 [MWh]. Dies bedeutet im Jahresmittel einen täglichen Wärmeaufwand von 204 [kWh/d].

Da die Zapfstellen für das Warmwasser zentral von einem Warmwasserspeicher in der Heizanlage versorgt werden, ist mit erheblichen Wärmeverlusten zu rechnen. In [3] (S. 21) wird begründet vermutet, dass die Zirkulationsverluste im Warmwassersystem etwa 100 bis 140 kWh pro Tag ausmachen, wobei noch steuerungsbedingte Verluste dabei sind. Wenn wir in der Ableseperiode von 120 kWh pro Tag ausgehen, so summieren sich die Zirkulationsverluste auf rund 35.4 [MWh].

Wenn man die Zirkulationsverluste von der Wärmeabgabe an den Speicher abzieht, so verbleiben 24.9 [MWh] für die Wassererwärmung in 295 Tagen. Daraus errechnet sich ein Warmwasserverbrauch von durchschnittlich 505 Litern Warmwasser pro Tag (Erwärmung von 10->50 °C).

In der Analyse [3] wird auf weitere Energievernichtungen bei der Warmwasserversorgung hingewiesen.

Nahwärmenetz

Es ist ein Nahwärmenetz vorhanden. Uns liegen jedoch keine Unterlagen zum Nahwärmenetz vor. Auf Grund einer Anlage mit ähnlichen Systemtemperaturen und Wärmeleistungen rechnen wir mit etwa 22'000 kWh Wärmeverlusten pro Jahr.

Energiebilanz + JAZ

Die vorhandenen Messeinrichtungen (Elektro- und Wärmehzähler) sind auf die JAZ-Berechnung der Wärmepumpe ausgerichtet. Die Wärmeverluste des Verteilnetzes der Heizung und des Warmwassers sind nicht erfasst und müssen auf theoretischem Wege abgeschätzt werden.

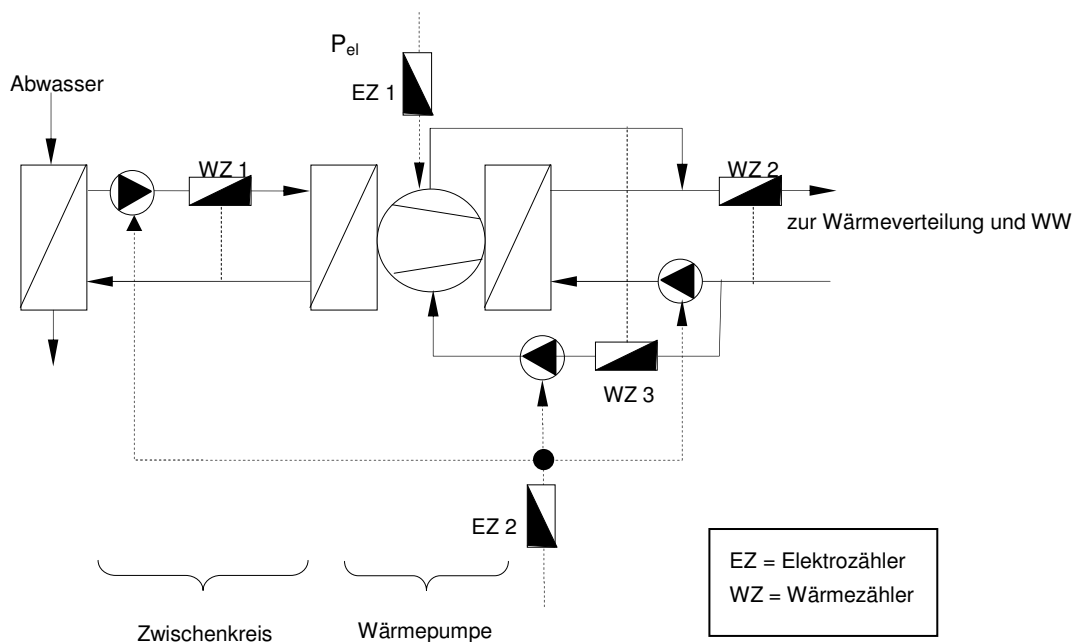


Abb. 7: Disposition der Messgeräte bei Anlage 4032

Für die Analyse der energetischen Situation der Anlage stehen uns folgende Angaben zur Verfügung:

Tab. 4: Wärmeproduktion und Energieverbrauch Anlage 4032 (u.a. [3], S. 20)

Zeile		1.4.2008 bis 21.1.2009	
1	Produzierte Wärme total	674.7	[MWh]
2	davon Wärmepumpe	627.5	
3	davon Gasheizkessel	47.2	
4	Elektroverbrauch total	236.8	[MWh]
5	davon Wärmepumpe (4653 h)	213.3	
6	davon Zwischenkreispumpe (5104 h)	22.5	
7	davon Pumpe Nahwärmenetz	1.0	
8	Wärmeverbrauch	674.7	[MWh]
9	davon Raumwärme	448.4	
10	davon Warmwassererwärmung	24.9	
11	davon Zirkulationsverluste	35.4	
12	davon Wärmeverlust Nahwärmenetz	22.0	
13	davon Bilanzfehler (Nahwärmenetz, unbekannte Verlustquellen, Messfehler)	144.1	
14	Betriebsstunden Wärmepumpe	4563	[h]
15	JAZ Anlage (93% v. Zeile 9+10/Zeile 4)	1.88	
16	JAZ Wärmepumpe (Zeile 2/Zeile 5+6)	2.66	
17	Warmwasserverbrauch, ca.	505	[dm3/d]
18	Anteil Gaskessel an Wärmeproduktion	7.0	[%]

Der Bilanzfehler von 144.1 [MWh] oder 21% der Wärmeproduktion in der Ableseperiode relativiert obige Aussagen. In [3] wird u.a. auf einen Softwarefehler in der Steuerung der Warmwasserladung hingewiesen, bei dem warmer Vorlauf direkt dem Rücklauf beigemischt wird. Trotzdem verbleibt ein viel zu hoher Bilanzfehler. Wenn ein Messfehler in der Wärmehzählung vorliegt, so würde die Wärme-

abgabe an Heizung und Warmwasser um diesen Betrag ansteigen und die Jahresarbeitszahl der Anlage ergäbe einen Wert von 2.42.

Die Arbeitszahl der Warmwasserversorgung liegt in der Ableseperiode etwa bei 1.09! Einer Nutzwärme von 24.9 [MWh] (Zeile 10 in Tab. 3) steht ein Aufwand an elektrischer Energie von 22.7 [MWh] gegenüber (Gesamtwärmeproduktion für Warmwasser 60.3 [MWh] dividiert durch JAZ Wärmepumpe von 2.66). Im Sommer dürften die Verhältnisse noch schlechter sein.

Erkenntnisse

1. Wenn mehrere Nutzer an der gleichen Wärmepumpe angeschlossen sind, so bestimmt die am höchsten eingestellte Heizkurve die Jahresarbeitszahl der Anlage. In vorliegenden Fall liegen die Heizgesetze der einzelnen Nutzer weit auseinander. Dies führt zu einer tiefen Jahresarbeitszahl der Anlage von nur 1.88. Hier ist allerdings darauf hinzuweisen, dass bei der Messung ein Bilanzfehler von 21 % vorhanden ist. Wenn dieser Fehler bei der Wärmebezugsseite erfolgt, steigt die JAZ der Anlage auf 2.42, was immer noch mager ist.
2. Die Verluste der Warmwasserversorgung sind recht hoch. Dies rührt daher, dass die Wärmeerzeugung zentral und die Warmwasserversorgung vom zentralen Speicher mittels Zirkulation erfolgen. Die JAZ der Warmwasserversorgung liegt bei etwa 1.09, was inakzeptabel ist.

Anlage 4035

Anlagebeschreibung

Die Anlage 4035 umfasst drei Überbauungen mit total 10 Mehrfamilienhäusern. Jede Überbauung enthält eine Heizzentrale, von der aus die angeschlossenen Mehrfamilienhäuser beheizt werden. Die Beheizung und die Warmwassererzeugung erfolgen dezentral und monovalent mit Wärmepumpen. Als Wärmequelle dient gereinigtes Abwasser aus der nahen ARA (kalte Verteilung). Die Distanz von der ARA zu den drei Heizzentralen beträgt zwischen 200 und 600 Meter. Die Heizzentrale B hat zusätzlich einen Heizkessel. Die Mehrfamilienhäuser pro Überbauung stehen räumlich eng beieinander, sodass keine grossen Nahwärmeverluste entstehen.

Tab. 1: Planungsdaten

Wärmebedarf total	2'184'000	[kWh/a]
Überbauung A (5 MFH), bivalent	1'200'000	
Überbauung B (3 MFH)	820'000	
Überbauung C (2 MFH)	164'000	
Wärmebedarfsleistung im Auslegungspunkt	806	[kW]

Situationsplan, Disposition Objekte: Nicht vorhanden

Beschreibung der Wärmepumpen und der Wärmequellen

Die Wärmepumpenanlage der Heizzentrale A besteht aus 2 Wärmepumpen mit Hubkolbenkompressoren für die Heizung.

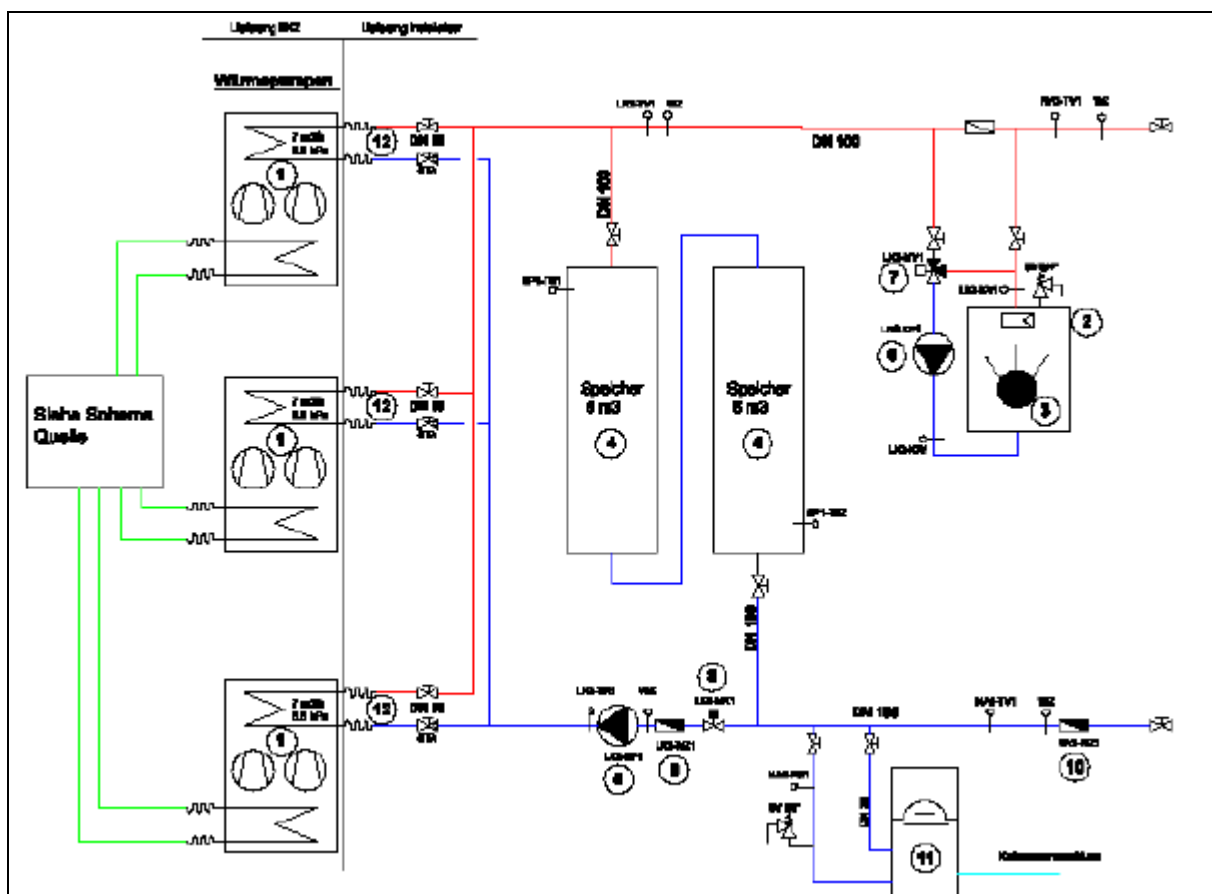


Abb. 2: Hydraulisches Schema der Wärmeerzeugung und -verteilung anhand der Heizzentrale A

Die Heizanlage B ist bivalent. Es bestehen getrennte Wärmepumpen für die Raumwärme und die Warmwasserbereitung. Mit Ausnahme des Heizkessels gilt dieses Konzept für alle Heizzentralen.

Die Heizleistungen werden wie folgt angegeben:

Tab. 2: Spezifikationen der Wärmepumpen (Herstellerangaben)

	Arbeitspunkt (Sole/Wasser) [°C]	Heizleistung [kW]	Kältemittel
Heizzentrale A 2 Wärmepumpen Heizung Warmwasser dezentral mit Boilern	6/47	336	R134a
Heizzentrale B 3 Wärmepumpen Heizung 1 Wärmepumpe Warmwasser Heizkessel	0/35 0/35	204 40 380	R407c R134a
Heizzentrale C 1 Wärmepumpe Heizung 1 Wärmepumpe Warmwasser	0/35 0/35	68 20	R407c R134a

Als Wärmequelle für die Heizwärmepumpe dient, wie oben erwähnt, gereinigtes Abwasser aus der nahe gelegenen ARA. Die Wassertemperatur variiert zwischen 12°C im Winter und 24°C im Sommer. Für die Abkühlung werden gemäss Planung 3 K veranschlagt. Der Wärmepumpenhersteller geht von 7°C Zulauftemperatur im Winter und von 9°C im Sommer aus.

Wärmequellenanlage

Als Wärmequelle dient gereinigtes Abwasser aus einer nahen ARA. Die Wärmepumpen sind über einen Zwischenkreis (Trennwärmetauscher) vom Abwasserkreislauf hydraulisch getrennt.

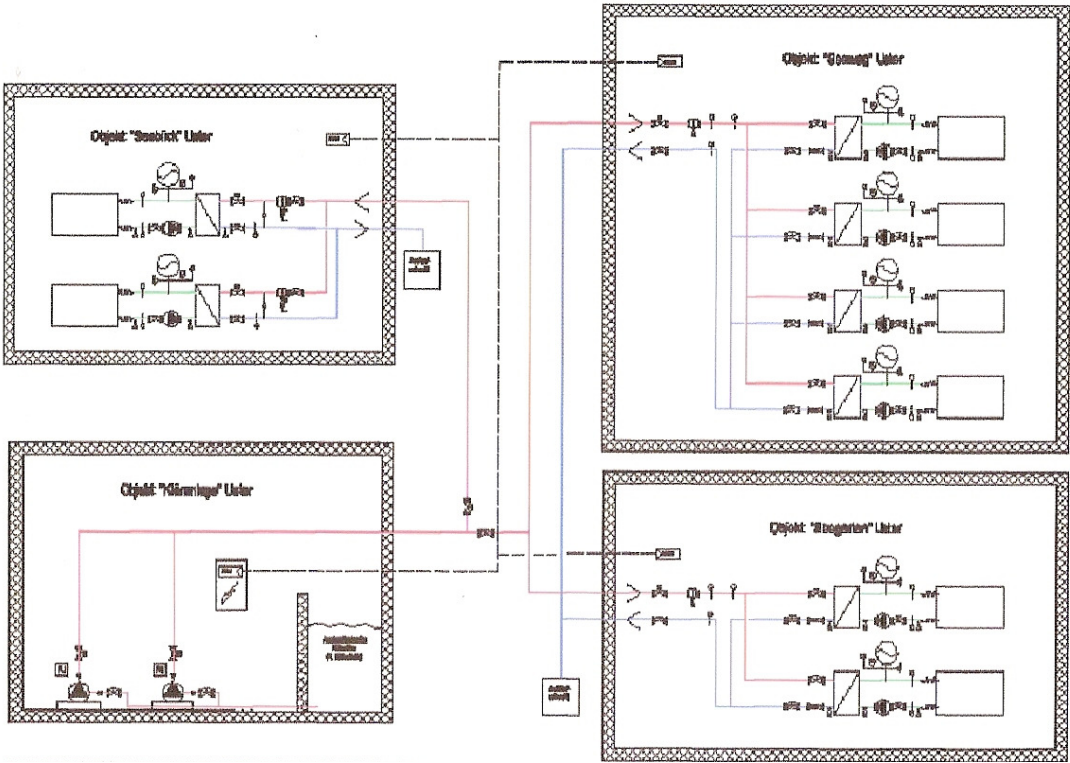


Abb. 3: Hydraulisches Schema der Wärmequellenanlage

Das gereinigte Abwasser aus der ARA wird mit zwei Pumpen à 7.5 kW elektrischer Leistungsaufnahme und je 70 m³/h Fördermenge an die Heizzentralen geliefert. Die sind FU-gesteuert. Der Rücklauf des Abwassers erfolgt über eine Meteorkanalisation und von dort direkt in den nahe gelegenen Fluss.

In der Heizsaison 04/05 wurden für alle Wärmepumpen zusammen 843'251 [kWh] Wärme aus der ARA bezogen. Bei 3 K Spreizung gemäss Planung sind dies 241'677 [m³] gereinigtes Abwasser. Bei voller Drehzahl konsumieren die Abwasserpumpen 0.107 kWh/m³ oder 0.0307 kWh_{el}/kWh_{th}. Bei geringeren Drehzahlen geht dieser Wert infolge der geringeren Druckdifferenzen etwas zurück, wobei der Anteil der geodätischen Förderhöhe unbekannt ist. Damit ergäbe sich ein Energieaufwand für die Abwasserpumpen von 25'860 [kWh/a]. Der reale Wert dürfte eher darunter liegen.

Systemtemperaturen Heizung

Tab. 2: Heizkurven (gemäss Reglereinstellung):

Objekt	Vor-/Rücklauf bei -10°C	Vor-/Rücklauf bei +5°C
Heizzentrale A	47/32	33/26
Heizzentrale B	47/32	33/26
Heizzentrale C	47/32	33/26

Warmwasser

Die Warmwasserversorgung erfolgt bei den Heizzentralen B und C mit separaten Wärmepumpen, bei Heizzentrale A mit dezentralen Elektroboilern. Die maximale Vorlauftemperatur wird mit 55°C bei 48 °C Rücklauftemperatur angegeben. Die Ladung der Warmwasserspeicher erfolgt zwischen 02:00 und 04:00. Für die Nachladung steht ein Elektroheizregister zur Verfügung, das zwischen 04:00 und 07:00 frei gegeben wird.

Dank der dezentralen Warmwassererzeugung fallen weder Nahwärmeverluste noch Auskühlverluste im Sommer an.

Nahwärmenetz

Die Anlage besteht aus dezentralen Wärmepumpen mit kalter Verteilung der Quellenwärme.

Energiebilanz + JAZ

Die Wärmeproduktion der Wärmepumpen und deren Stromverbrauch werden zwecks Heizkostenabrechnung erfasst. Für die Analyse der energetischen Situation der Anlage stehen folgende Ablesedaten zur Verfügung:

Tab. 3: Wärmeproduktion und Energieverbrauch Anlage 4032

Zeile		Heizzentrale A 2004/05	Heizzentrale B 2001/2003 2003/2004 2004/2005	Heizzentrale C 2003/2004 2004/2005	
1	Produzierte Wärme für Heizung und Warmwasser	661'923	298'633	182'063	[kWh]
2	Elektroverbrauch	160'059	95'383	43'925	[kWh]
3	davon Wärmepumpen	144'652	89'143	39'685	
4	davon ARA-Pumpen	15'407	6'240	4'240	
5	Wärmebezug von ARA	501'864	203'249	138'138	[kWh]
6	JAZ Anlage (Zeile 1/Zeile 2)	4.14	3.13	4.14	
7	JAZ Wärmepumpe (Zeile1/Zeile3)	4.58	3.35	4.59	

Wirtschaftlichkeit

Es liegen uns nur die Daten der Investitionskosten vor.

Tab. 7: Investitionen in die Heizanlage

Position	Werkverträge (inkl. 7.6 % WMSt)	Einheit	%
Planung, Projektierung, Bauleitung	212'948	[Fr.]	13.7
ARA-Pumpstation mit kalter Fernleitung, Meteor- leitung	726'187	[Fr.]	46.3
Wärmeerzeugung WP Heizung und Warmwasser, Steuerung, Verrohrung	627'988	[Fr.]	40.0
Total ohne MWSt.	1'567'123	[Fr.]	100
Total mit MWSt.	1'686'224	[Fr.]	
Investitionskosten pro kW installiert (806 kW)	2'092	[Fr/kW]	
Investitionskosten Quellenanlage pro kW Heizlei- stung + Anteil Planung (13.7%)	1'024	[Fr/kW]	

Erkenntnisse

1. Die Analyse dieser Anlage zeigt, dass mit dezentralen Wärmepumpen, die mit gereinigtem Abwasser als Wärmequelle versorgt werden, hohe Jahresarbeitszahlen erreicht werden können. Die Verluste des Nahwärmenetzes entfallen und auf der Quellenseite ist der Pumpenaufwand mit 3.07% der Kompressorleistung ebenfalls sehr gering, sofern – wie hier – die Distanzen zwischen ARA und Heizzentrale nicht zu gross sind.
2. Die effektiven Wärmeverbräuche liegen weit unterhalb der planerisch ermittelten.

Anlage 4036

Anlagebeschreibung

Die Anlage 4036 ist eine Überbauung mit 8 Mehrfamilienhäusern. Die Heizwärme wird zentral mittels einer Wärmepumpe erzeugt und via ein Nahwärmenetz verteilt. Als Wärmequelle dient Grundwasser. Das Warmwasser wird mit der gleichen Wärmepumpe ebenfalls zentral erzeugt. In den Unterstationen der 8 Objekte befindet sich je ein 2000 Liter WW-Speicher mit innen liegendem Wärmetauscher, der ab Nahwärmenetz erwärmt wird.

Tab. 1: Planungsdaten

Installierte Wärmeleistung	336	[kW]
Auslegeleistung Heizung (24 h)	275	[kW]
Auslegeleistung Warmwasser (2 h)	196	[kW]
Benötigte Wärmeleistung bei 20 h Laufzeit pro Tag	350	[kW]
Vor-/Rücklauf ab Heizwärmepumpe		
Heizung	48/35	[°C]
Warmwasser	63/50 ³⁷	[°C]
Warmwasserendtemperatur	58	[°C]
EBF total	6312	[m ²]
Laufzeiten Wärmepumpen		
Sperrzeiten pro Tag	3	[h/d]
Wiederanlaufsperr (geschätzt)	1	[h/d]
Nettolaufzeit Wärmepumpen	20	[h/d]

Die Wärmepumpe wird pro Tag 3 Stunden gesperrt. Dazu kommt die kumulierte Wiederanlaufsperr von etwa 1 Stunde. Für die Warmwasserladung rechnen wir mit 2 Stunden, sofern beide Wärmepumpen an der Ladung teilnehmen. Im Auslegepunkt ergibt sich ein Wärmebedarf von $24 \cdot 275 + 2 \cdot 198 \text{ kWh} = 6992 \text{ kWh}$ pro Tag. Dieser Wärmebedarf muss in 20 Stunden erbracht werden, woraus eine Wärmeleistung von 350 kW resultiert. Die beiden Wärmepumpen leisten zusammen gemäss Herstellerangabe 336 kW.

Hydraulisches Schema der Wärmeverteilung:

Die Anlage arbeitet ohne Trenn-Wärmetauscher in den Unterstationen.

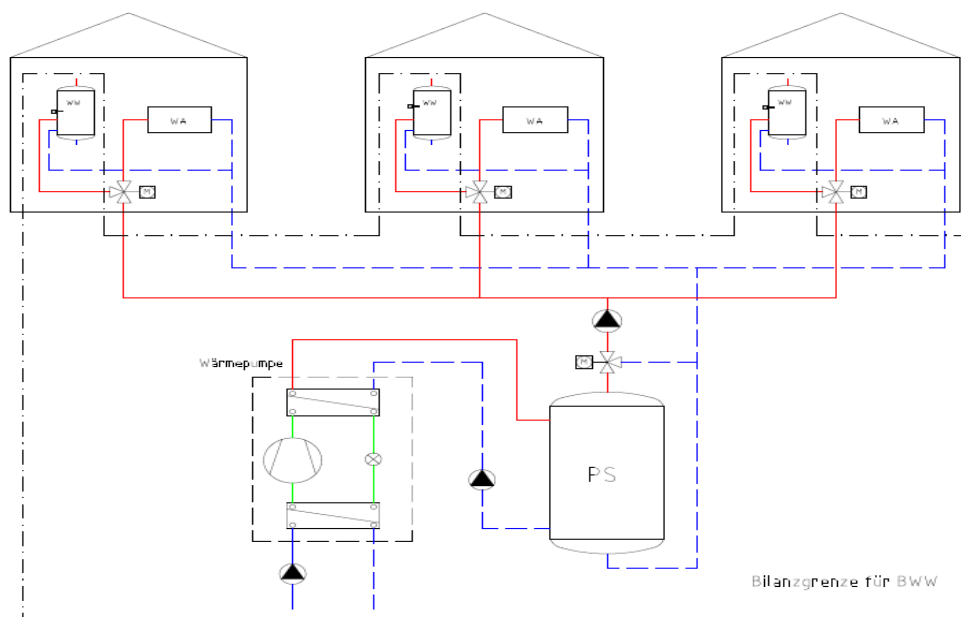


Abb. 1: Hydraulisches Schema der Wärmeerzeugung und -verteilung

Beschreibung der Wärmepumpen und der Wärmequellen

Die Wärmepumpenanlage besteht aus zwei identischen Wärmepumpen à 168 kW Nennleistung (Wärmeabgabe) beim Arbeitspunkt W10/W50. Jede Wärmepumpe hat zwei Leistungsstufen. Als Wärmequelle dient Grundwasser. Es sind zwei in Serie geschaltete 3600-Liter-Speicher vorhanden.

Die Heizleistungen der Wärmepumpen werden wie folgt angegeben:

Tab. 2: Spezifikationen der Wärmepumpen (Herstellerangaben)

	Arbeitspunkt [°C]	Heizleistung [kW]	Antriebsleistung [kW]	COP	Kältemittel
Wärmepumpe Heizung	W10/W50	2x168 kW	2x40	4.2	R410A

Als Wärmequelle für die Heizwärmepumpe dient, wie oben erwähnt, Grundwasser. Der Planung geht von einer Grundwassertemperatur von 10 °C aus.

Betriebskonzept Heizung

Die Heizkurven der beteiligten Objekte sind in etwa identisch. Obwohl gemäss Planung von Wohnung zu Wohnung leicht unterschiedliche Vorlauftemperaturen angegeben werden, prägt der Hauptvorlauf ab Wärmepumpe das Vorlauftemperaturregime aller Verbraucherguppen. Es sind keine Trenn-Wärmetauscher in den Unterstationen der Gebäude vorhanden.

Tab. 3: Technische Daten, Vorlauftemperaturen (Planung)

Heizgruppe	Vorlauf im Auslege- punkt (-8 °C) [°C]	Rücklauf im Ausle- gepunkt (-8 °C) [°C]	Wärmeleistung im Auslegepunkt Heizung/WW [kW]
Hauptvorlauf ab Wärmepumpe			
Heizbetrieb	48	35	276
Warmwasserladung	63	50	196
Haus A	44	34	27.5/17.2
Haus B	44	34	27.5/17.2
Haus C	44	34	36.8/27.0
Haus D	44	34	36.8/27.0
Haus E	44	34	36.8/27.0
Haus F	44	34	36.8/27.0
Haus G	44	34	36.8/27.0
Haus H	44	34	36.8/27.0
Nahwärmeverbund Ost			
• Heizung	48	35	276
• BWW	63	50 ³⁸	196

Es erfolgt keine Nachtabenkung, um den Anteil Niedertarif hoch zu halten. Aus dem gleichen Grund wird die Wärmepumpe tagsüber während 3 Stunden unterdrückt.

Warmwasser

Jedes Gebäude verfügt über eine Unterstation mit einem WW-Speicher von 2000 Liter Inhalt. Die Wärmeversorgung erfolgt ab Nahwärmenetz von der Heizwärmepumpe. Der Speicher wird ab Nahwärmenetz mit einem innen liegenden Glattrohr-Wärmetauscher (Naturzug auf der WW-Seite, 3.5 m²) erwärmt. Die Wärmeübertragungsleistung wird mit 20 kW angegeben (vermutlicher mittlerer Temperaturabstand ca. 10 K, Temperaturabstand Vorlauf->Warmwasser ca. 13 K). Die Vorlauftemperatur ab Wärmepumpe wird mit 63 °C angegeben. Das Warmwasser wird auf 50 °C erwärmt.

³⁸ Schätzung

Die Speichergrösse ist mit 2000 Litern grosszügig ausgelegt, sodass vermutlich ein einmaliges Laden pro Tag genügt. Die Ladezeit beträgt maximal etwa 3.9 h mit einer aktiven Wärmepumpe und knapp 2 Stunden, wenn beide Wärmepumpen während des Ladevorgangs aktiv sind.

Die Warmwasserverteilung wird mit einer Begleitheizung hochgehalten. Es konnte nicht eruiert werden, ob der Strom der Begleitheizung vom Elektrozähler erfasst wird oder nicht.

Die Versorgung der dezentralen WW-Speicher ab zentraler Wärmepumpe hat diverse Verluste zu Folge. Bei jedem Ladevorgang muss das Nahwärmenetz auf 63 °C hochgefahren werden. Diese innere Energie geht ausserhalb des Heizbetriebs nach Abstellen des Ladevorgangs verloren. Es stellt sich zudem die Frage, was die beiden Zentralspeicher während des Ladevorgangs machen. Wenn sie ebenfalls aufgeladen werden, sind die Auskühlverluste höher. Da der Ladezustand der dezentralen WW-Speicher zu Beginn des Ladevorgangs unterschiedlich ist, erreichen diese zu unterschiedlichen Zeiten das Ende der Ladung. Spätestens wenn ein WW-Speicher abgeschaltet wird, die Wärmepumpe aber noch weiter arbeitet, wird sich ein Teil des Vorlaufs an die Heizspeicher abgegeben, womit diese aufgeladen werden. Wegen des grossen Speichervolumens kühlen diese nur sehr langsam aus, sodass sich dieser Wärmeverlust in Grenzen hält.

Ebenfalls verloren sind die an die Umgebung abgegebene Wärme, sowie der elektrische Pumpenaufwand der Nahwärmenetzpumpe. In der Heizsaison verursacht der Ladevorgang wegen der im Mittel etwa 25 K höheren Vor- und Rücklauftemperaturen höhere Wärmeverluste. Diese Verluste wurden rechnerisch anhand der Nahwärmenetzdimensionen und dessen Isolationsstärke abgeschätzt:

Tab. 4: Wärmeverluste im Nahwärmenetz durch Warmwasserbetrieb

Wärmeverluste an Umgebung Sommer	1608	[kWh]
Zusätzliche Wärmeverluste an Umgebung Winter	778	[kWh]
Aufheizverluste im Sommer	6121	[kWh]
Total Warmwasser	8507	[kWh]

Für die Aufheizverluste haben wir eine eineinhalbmahlige Ladung pro Tag angenommen. Der Pumpenaufwand der Warmwasserversorgung beträgt:

Tab. 5: Elektrische Pumpenenergie für Warmwasser

Nahwärmenetzpumpe	- Winter	606	[kWh]
	- Sommer	145	[kWh]
Grundwasserpumpe	- Winter	3369	[kWh]
	- Sommer	2407	[kWh]
Total Warmwasser		6527	[kWh]

Nahwärmenetz

Das Nahwärmenetz arbeitet ohne Trenn-Wärmetauscher direkt auf die Unterstationen. Sämtliche Leitungen des Nahwärmenetzes verlaufen in den unterirdischen Garagen. Für die Wärmeverlustberechnungen haben wir eine mittlere Temperatur von 10 °C angenommen.

Die Nahwärmeverluste setzen sich zusammen aus den Wärmeverlusten für den Heizbetrieb und den zusätzlichen Wärmeverlusten durch erhöhte Ladetemperatur (63 °C) während der Warmwasserladung im Winter.

Tab. 6: Wärmeverluste Nahwärmenetz

Wärmeverluste Heizbetrieb	13832	[kWh]
Wärmeverluste Warmwasser, Winter	778	[kWh]
Wärmeverluste Warmwasser, Sommer	1608	[kWh]
Aufheizverluste Warmwasser	6121	[kWh]
Total	22339	[kWh]
Anteil Heizbetrieb	13832	[kWh]
Anteil Warmwasserbetrieb	8507	[kWh]

Der elektrische Aufwand für die Nahwärmenetzpumpen beträgt:

Tab. 7: Elektrischer Aufwand für Nahwärmenetzpumpe

Anteil Heizbetrieb	2412	[kWh]
Anteil Warmwasserbetrieb (Sommer)	145	[kWh]
Total	2557	[kWh]

Da die Nahwärmenetzpumpen *im Heizbetrieb* mit oder ohne Warmwasserbereitung durchgehend im Betrieb sind, haben wir den elektrischen Energieaufwand für die Nahwärmenetzpumpen vollumfänglich dem Heizbetrieb zugeschlagen. Somit entfällt nur der Sommerbetrieb auf die Warmwasserbereitung.

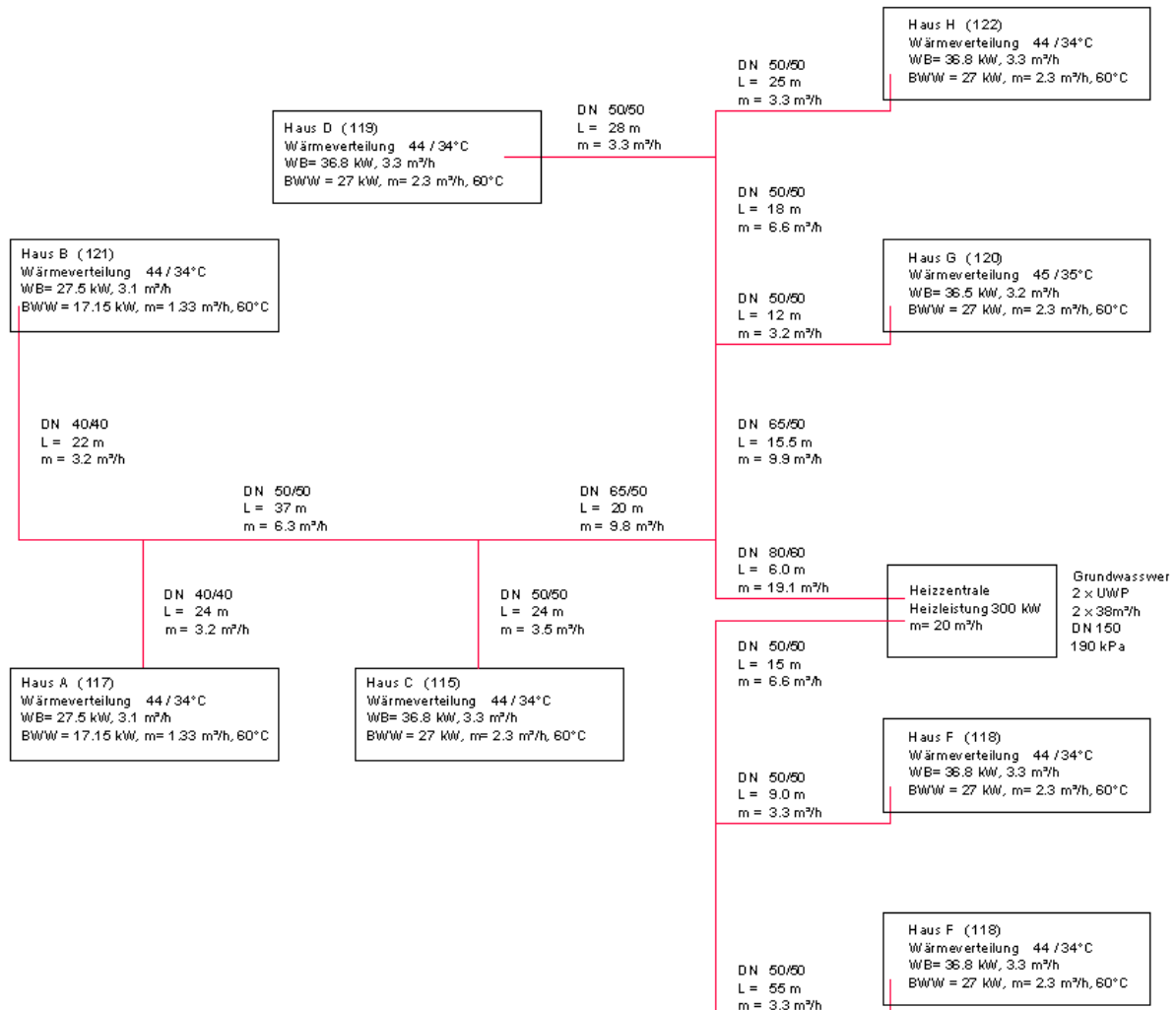


Abb. 2: Nahwärmenetz Anlage 4036

Laufzeiten

Wenn die Energieaufnahme der Nebenaggregate nicht mittels Elektrozählern individuell erfasst wird, (was kaum je der Fall ist), kann alternativ die Berechnung der Energieaufnahmen der diversen Nebenaggregate über deren Laufzeiten und Nennleistungen ermittelt werden.

Im vorliegenden Fall müssen die Laufzeiten der Grundwasserpumpen anhand verschiedener Indizien abgeschätzt werden³⁹. Die Grundwasserpumpen arbeiten immer dann, wenn mindestens eine Wärmepumpe aktiv ist. Auf Grund der Wärmeproduktion beider Wärmepumpen kann das Intervall der Laufzeit je WP berechnet werden:

³⁹ Theorie dazu siehe im Hauptteil Kapitel 2. Methodik

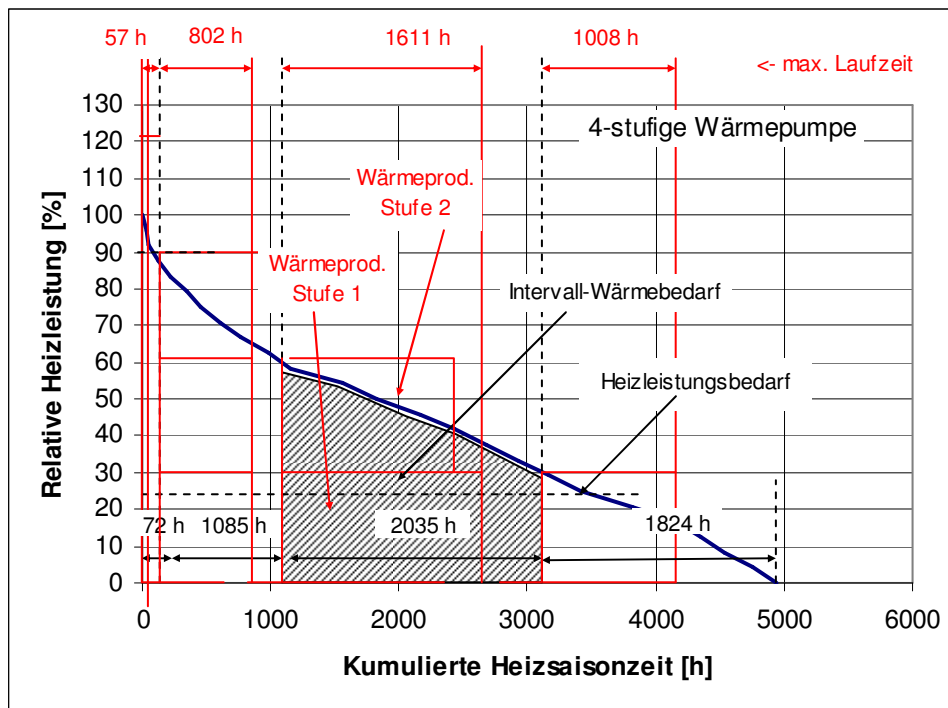


Abb. 3: Laufstunden der Wärmepumpen von Anlage 4036 im Heizbetrieb

Abb. 3 zeigt den Verlauf der Wärmebedarfsleistung für die Raumwärme für das Schweizer Mittelland. Die Wärmeleistung der 4 WP-Stufen beträgt 336 kW bei 275 kW Auslegeleistungsbedarf für die Raumwärme. Die Wärmeleistung der WP beträgt somit 120 % des Auslegebedarfes. Jede Stufe leistet also 30% des Auslegebedarfes. Wir nehmen als Beispiel das Leistungsintervall 30 bis 60% der Auslegeleistung. Die schraffierte Fläche zeigt den Wärmebedarf zwischen 30 und 60 % der Auslegeleistung. Dieser Wärmebedarf dauert 2035 h. Dies ist aber nicht die Laufzeit der Wärmepumpe. Die Wärmeabgabe der Wärmepumpe wird durch das rote Rechteck wiedergegeben. Wegen Sperrzeiten (3 h) und Warmwasseraufladung kann die Wärmepumpe pro Tag maximal 19 Stunden für die Heizwärme arbeiten. Für die Bereitstellung der benötigten Heizwärme stehen der Wärmepumpe also maximal 19/24 der Intervallzeit zur Verfügung, also 1611 h. Die anderen Leistungsintervalle werden analog behandelt. Die zugehörigen Laufstunden zeigt Tabelle 8.

Tab. 8: Intervallzeiten und Laufstunden der Wärmepumpen

Leistungsstufe	Intervallzeit [h/a]	Max. Laufzeit WP [h/a]	Laufzeit Grundwasserpumpe 1	Laufzeit Grundwasserpumpe 2
4-stufig	72	57	859	859
3-stufig	1085	802		
2-stufig	2035	1611	2619	0
1-stufig	1825	1444 ⁴⁰		
Total Heizung	4944		3478	859
Warmwasser	730	730	730	730
Total			4208	1589

Die Nahwärmenetzpumpen arbeiten in der ganzen Heizsaison und im Sommer für die Warmwasserproduktion. Da es sich um Objekte mit (praktisch) Minergiestandard handelt, dürfte die Heizsaison maximal 7 Monate oder rund 5000 Stunden dauern. Damit verbleibt für die Sommersaison (nur Warmwasserbetrieb) 5 Monate.

Für den Warmwasserbetrieb im Sommer gehen wir von 2 Stunden Ladezeit pro Tag aus, wobei auf Grund der Auslegung vermutlich beide Wärmepumpen in Betrieb sind. Aus diesen Annahmen ergibt sich eine Laufzeit der Nahwärmenetz- und Grundwasserpumpen von 300 Stunden.

⁴⁰ Die effektive Laufzeit der Stufe 1 ist geringer als die maximal mögliche, da für die Deckung des Wärmebedarfs im Intervall 4 nur 1008 statt 1444 Laufstunden nötig sind.

Energiebilanz + JAZ

Die vorhandenen Messeinrichtungen (Elektro- und Wärmehzähler) sind auf die Heizkostenabrechnung ausgerichtet. Die Wärmehzähler erfassen den Wärmeverbrauch für Heizung und Warmwasser pro Gebäude. Die Wärmeverluste der zentralen Heizungsspeicher und im Nahwärmenetz werden nicht erfasst. Sie werden rechnerisch abgeschätzt. Der Elektrozähler erfasst hingegen den Stromverbrauch der Wärmepumpen inklusive der Quellenanlage und des Nahwärmenetzes.

Für die Analyse der energetischen Situation der Anlage stehen folgende Ablesedaten zur Verfügung:

Tab. 9: Wärmeproduktion und Energieverbrauch Anlage 4036

Zeile		1.7.2008-30.6.2009	
1	Produzierte Wärme	453'007	[kWh]
	an Heizung	358'533	[kWh]
	an Warmwasser	72'136	[kWh]
	an Nahwärmenetz und Speicher	22'338	[kWh]
2	Elektroverbrauch, total	161'037	[kWh]
	davon Wärmepumpen	137'634	[kWh]
	davon Grundwasserpumpe	20'846	[kWh]
	davon Nahwärmenetzpumpe	2'557	[kWh]
3	JAZ Anlage	2.67	
	JAZ Wärmepumpe	3.29	
4	Warmwasserverbrauch	unbekannt	[m3]
5	Heizwärmeverbrauch pro m2 EBF	56.8	[kWh/m2]

Die mittlere Vorlauftemperatur beträgt gemäss Planung etwa 43.1 °C (gewichtetes Mittel aus Heiz- und WW-Betrieb). Damit müsste die JAZ der Wärmepumpe (also ohne Nebenantriebe), ausgehend von den Herstellerangaben, bei 3.84 liegen (Punkt B in Abb. 6). Der auf Grund der Felddaten ermittelte Wert von 3.29 liegt deutlich darunter (Punkt A). Dies kann verschiedene Ursachen haben. Das Ein- und Ausschalten der Kompressoren bewirkt Verluste, die in den Herstellerangaben nicht berücksichtigt werden. Sodann mussten die *mittleren* Vorlauftemperaturen anhand des geplanten Heizgesetzes geschätzt werden. Ein weiterer Unsicherheitspunkt liegt im Teillastregime der Wärmepumpen. Wir sind bei der Berechnung der Laufzeiten der Wärmepumpen und der Quellenpumpen bei der Warmwasserversorgung von Volllast ausgegangen.

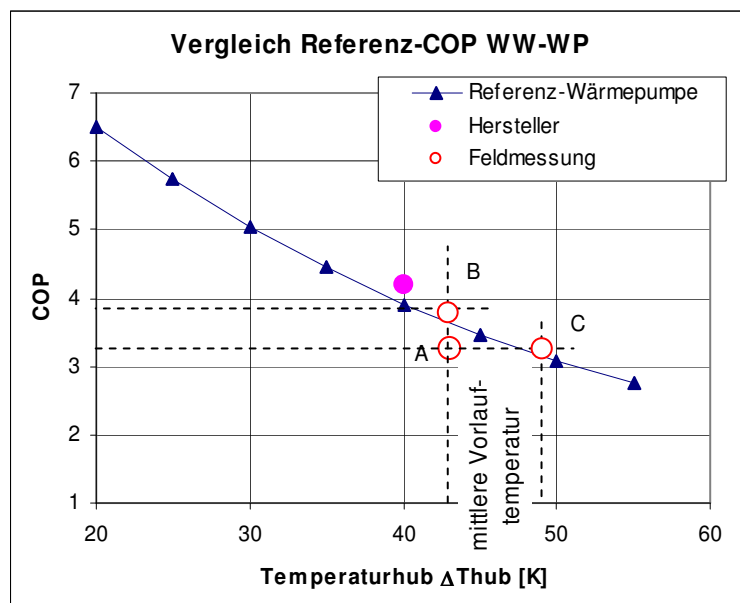


Abb. 4: Jahresarbeitszahl

Wenn jedoch bei einer Wärmepumpe nur ein Kompressor aktiv ist, verlängern sich die Laufzeiten, was insbesondere bei der elektrischen Energieaufnahme der Grundwasserpumpen zu Buche schlägt. Es ist zu vermuten, dass die ermittelte Energieaufnahme der Grundwasserpumpen zu niedrig angesetzt ist. Dies schlägt auf den Nettostromverbrauch durch, da dieser vom Bruttobezug abzüglich Nahwärmenetz- und Grundwasserpumpen berechnet wird. Der elektrische Strombedarf der Grundwasserpumpen wurde aus den Planungsdaten bezüglich Volumenstrom und Förderhöhe mit einem Gesamtwirkungsgrad von 0.5 berechnet. Alternativ kann man die Laufstunden der Grundwasserpumpen mit der elektrischen Nennleistung von 4.0 kW multiplizieren und erhält 23188 kWh_{el}. Würde man diesen letzten Wert unterstellen, so steigt die JAZ der Wärmepumpe auf 3.33.

Sucht man andererseits die Ursache der Diskrepanz bei der mittleren Vorlauftemperatur, so müsste diese bei 49.3 °C liegen (Punkt C in Abb. 4), um aus den Herstellerangaben den JAZ-Wert von 3.29 zu erhalten.

Wirtschaftlichkeit

Es liegen keine Anhaben zu den Investitionskosten vor.

Tab. 9: Betriebskosten, Wärmepreis

Position	Kosten (inkl.MWSt)	Einheit
Energiekosten	24'185.00	[Fr]
Heizungsservice	0.00	[Fr]
Heizwartentschädigung	200.00	[Fr]
Abrechnungsservice	2'238.10	[Fr]
Fernüberwachung WP-Anlage	1228.85	[Fr]
Total Heizkosten pro Jahr	27'851.95	[Fr]
Wärmebezug netto	430'669	[kWh/a]
Wärmepreis (ohne Kapitalkosten)	6.47	[Rp/kWh]

Erkenntnisse

1. Da die Heizkurven der beteiligten Objekte in etwa identisch sind, könnte der Hauptvorlauf auf dem Niveau dieser Heizgesetze gefahren werden. Er wird jedoch etwa 4 Kelvin höher gefahren. Dadurch wird die JAZ um etwa 10 % verschlechtert.
2. Die WW-Speicher arbeiten mit innen liegenden Registern. Erfahrungsgemäss bedingen solche Register einen grossen Temperaturabstand (Grädigkeit) zwischen den beiden Wärmeträgern. Dadurch muss bei gleicher Warmwassertemperatur mit einer höheren Vorlauftemperatur ab Wärmepumpen gefahren werden, was die JAZ reduziert. Im vorliegenden Fall beträgt der Temperaturabstand zwischen Vorlauf Nahwärmenetz und Warmwassertemperatur etwa 13 K.
3. Durch die zentrale Erzeugung des Warmwassers muss im Sommerbetrieb der ganze Inhalt des Nahwärmenetzes von etwa 15 °C auf 63 °C erwärmt werden. Nach erfolgter Ladung kühlt der Inhalt der Nahwärmeversorgung ungenutzt wieder aus. Dieser Vorgang erfolgt täglich mindestens einmal, meist zweimal, wenn auch tagsüber eine Nachladung erforderlich ist.

Anlage 4038

Anlagebeschreibung

Die Anlage 4038 ist eine Überbauung mit 6 Mehrfamilienhäusern mit total 36 Wohnungen und 4 Reiheneinfamilienhäusern à 3 Einheiten. Die Bauten sind nach Minergie-Standard ausgeführt. Die Raumwärme wird durch eine zentrale Wärmepumpe erzeugt und via ein Nahwärmenetz an die 10 Objekte verteilt. Die Leitungen des Wärmeverteilnetzes sind alle in der unterirdischen Garage verlegt. Es besteht also keine Erdverlegung. Das Warmwasser wird dezentral in vier Unterstationen erzeugt, wobei während des Heizbetriebs der Rücklauf der Heizanlage als Wärmequelle genutzt wird. Im Winter erfolgt die Warmwassererwärmung also zweistufig. Im Sommer wird die Fernleitung über einen separaten Wärmetauscher direkt mit Wärme aus dem Abwasser versorgt. In diesem Fall ist die Wärmeerzeugung also einstufig. Das Warmwasser wird auf 68-70 °C erwärmt [1]. Bei einer Begehung am 26.5.09 lag die Temperatur aller Speicher um die 57°C. Der HD-Pressostat ist auf 69°C eingestellt. Es besteht eine Zirkulation.

Als Wärmequelle wird gereinigtes Abwasser aus der nahen ARA genutzt. Für die Förderung des Abwassers stehen drei Pumpen zur Verfügung, von denen jeweils zwei aktiv sind. Der Höhenunterschied zwischen WP-Anlage und ARA beträgt 2 m. Die Abwassertemperatur variiert von 12 °C im Winter bis 24 °C im Sommer. Durch die Nutzung wird das Abwasser um 4 - 5 K abgekühlt. Die Leitungslänge zwischen ARA und Wärmepumpe beträgt 140 m. Das abgekühlte Wasser wird an einen vorbei fließenden Bach abgegeben.

Die Mehrkosten der Anlage werden mit 500'000 angegeben. Die Anlage ist mit Wärmezählern Seite Wärmepumpe und Seite Wohneinheiten versehen. Der Warmwasserverbrauch wird je Wohneinheit in m³ gemessen.

Tab. 1: Planungsdaten

	Total	Heizung	WW	
Wärmebedarf total	538'850	247'090	291'76	[kWh/a]
Wärmeleistung Heizung im Auslegepunkt		130		[kW]
Jahresarbeitszahl		4.0	4.5	
Stromverbrauch		61'835	64'940	[kWh/a]
Vorlauf ab Heizwärmepumpe	35 °C bei -10 °C			
Warmwasserendtemperatur			62 ⁴¹	[°C]
EBF	ca. 6600			[m2]

Situationsplan, Disposition Objekte:



Abb. 1: Situationsplan der Überbauung

⁴¹ Der Planer geht von 50 K Erwärmung aus. Bei 12°C Kaltwassertemperatur ergäbe sich somit eine Warmwasser-Endtemperatur von 62°C.

Hydraulisches Schema der Wärmeverteilung:

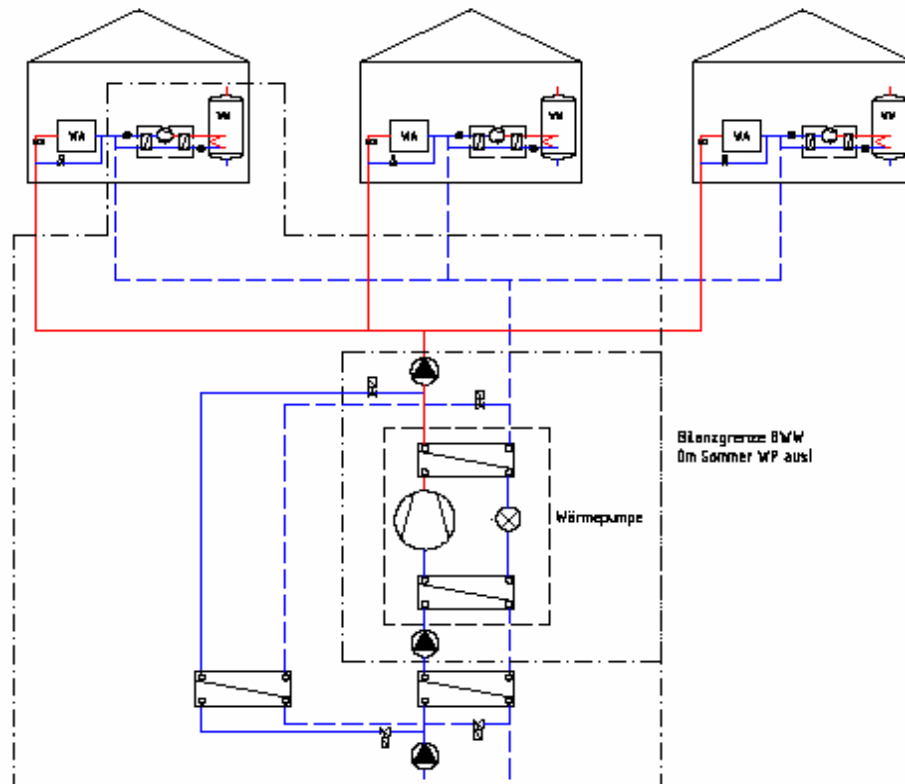


Abb. 2: Hydraulisches Schema der Wärmeerzeugung und -verteilung (nur 3 Objekte eingezeichnet)

Die Warmwasser-Wärmepumpen in den Unterstationen beziehen die Quellenwärme während des Heizbetriebs aus dem Rücklauf der Heizung. Ausserhalb des Heizbetriebs wird der Nahwärmekreislauf direkt aus dem ARA-Abwasser gespeist.

Betriebskonzept Heizung

Tab. 2: Heizkurven (gemäss Reglereinstellung):

Objekt	Vorlauf bei -10 °C	Vorlauf bei +15 °C
Haus 41/43	35 (+2)	26 (+2)
Haus 1-6	35 (+5)	23 (+5)
Haus 7-12	35 (+5)	26 (+5)
Haus 44/45/49/51	50 (+2)	32 (+2)

Bei allen vier Objekten wird die Vorlauftemperatur um 2 bis 5 K höher gefahren als es der Grundeinstellung entspricht. Beim Objekt 44/45/49/51 liegen die eingestellten Vorlauftemperaturen im Auslegungspunkt sogar um volle 17 K höher als gemäss Planung. Auffallend ist die hohe Einstellung der Heizkurve bei der Unterstation zu den MFH 44/45/49/51. Wir vermuten, dass sich Mieter über zu geringen Komfort beklagten und daher die Heizkurve nach oben verstellt wurde. Dies ist aber zwecklos, ausser die Heizkurve der Heizwärmepumpe würde ebenfalls entsprechend angehoben. Nach Rücksprache wurde uns bestätigt, dass der Hauptvorlauf effektiv bei 35 °C belassen wurde.

Beschreibung der Wärmepumpen und der Wärmequellen

Die Wärmepumpenanlage besteht aus einer zentralen, dreistufigen Heizwärmepumpe für alle Gebäude und aus 4 dezentralen WW-Wärmepumpen in den Unterstationen. Die Heizwärmepumpe ist dreistufig. Als Wärmequelle dient gereinigtes Abwasser aus der nahe gelegenen ARA. Die Warmwasser-Wärmepumpen beziehen ihre Quellenwärme während der Heizsaison aus dem Rücklauf des Nahwärmenetzes. Ausserhalb der Heizsaison wird das Nahwärmenetz über einen separaten Wärmetauscher vom ARA-Netz aufgeladen.

Die Heizleistungen werden wie folgt angegeben:

Tab. 3: Spezifikationen der Wärmepumpen (Herstellerangaben)

	Arbeitspunkt [°C]	Heizleistung [kW]	Antriebsleistung [kW]	COP	Kältemittel
Wärmepumpe Heizung	-3/42	163.4	40.7	4.01	R407C
Warmwasser-WP, EFH 1-6	3/64	6.28	2.20	2.86	R134a
Warmwasser-WP, EFH 7-12	3/64	6.28	2.20	2.86	R134a
Warmwasser-WP, MFH EF	3/64	12.74	4.40	2.90	R134a
Warmwasser-WP, MFH AB+CD	3/64	2*12.74	2x4.40	2.90	R134a

Wärmequelle

Als Wärmequelle für die Heizwärmepumpe dient wie oben erwähnt gereinigtes Abwasser aus der nahe gelegenen ARA. Die Wassertemperatur variiert zwischen 12°C im Winter und 24°C im Sommer. Für die Abkühlung werden gemäss Planung 3 K veranschlagt. Der Wärmepumpenhersteller geht von 7°C Zulufttemperatur im Winter und von 9°C im Sommer aus.

Im ersten Betriebsjahr betrug der Stromverbrauch der ARA-Pumpen 27'000 kWh. Nach Auswechslung der Pumpen reduzierte sich der Strombezug auf 19'383 [kWh].

Warmwasser

Die Warmwasserwärmepumpen arbeiten auf Speicher mit 1000 Liter bei den EFH resp. 2000 Liter bei den MFH. Die Kondensatoren liegen als Register in den Speichern.

Der Wärmeverbrauch für die Warmwasserbereitung wird nicht direkt gemessen. Er muss indirekt aus anderen Ablesedaten eruiert werden. Die Warmwasserbereitung unterscheidet sich im Sommer und in der Heizperiode. In der Heizperiode entnehmen die Warmwasser-Wärmepumpen ihre Quellenwärme dem Rücklauf der Heizung. Im Sommer entnehmen sie diese direkt dem gereinigten Abwasser (Abb. 2). In der Heizperiode liegt also eine kaskadierte Wärmepumpenschaltung vor.

Gemäss Ablesungen der Wärmezähler beträgt die Differenz der Wärmezählungen an der Heizwärmepumpe und der Wärmeabgabe an die Raumheizungen in der Heizsaison 2007/08 81'944 [kWh]. Wenn man davon noch die Wärmeverluste des Nahwärmenetzes von 2'725 kWh abzieht, erhält man die netto von den Warmwasser-Wärmepumpen aus dem Heizungsrücklauf bezogene Quellenwärme. Sie beträgt 79'219 [kWh]. Wenn man für die Warmwasser-Wärmepumpen eine Arbeitszahl von 5.3 unterlegt (mittlere Rücklauftemperatur 25°C, mittlere Warmwassertemperatur 50°C), so beträgt die aufgenommene elektrische Energie der Warmwasser-WP 18'423 [kWh] (ohne die in der Quelle verborgene elektrische Energie) und die Wärmeabgabe ans Warmwasser in der Heizsaison 97'642 kWh.

Im Sommerbetrieb sind die Arbeitszahlen der Warmwasser-Wärmepumpen tiefer, da nun ein grösserer Temperaturhub zwischen Quelle und Warmwasser besteht. Dieser beträgt im Sommer etwa 38°C, welches eine geschätzte Arbeitszahl der Wärmepumpe von 4.5⁴² ergibt. Wenn wir den Heizbetrieb mit 7 Monaten und den Sommerbetrieb mit 5 Monaten annehmen, so beträgt die Wärmeproduktion der Warmwasser-WP unter der Annahme gleichen Verbrauchs im Sommer 69'744 [kWh] und der Stromverbrauch (ohne ARA-Pumpe) 15'499 [kWh].

Zusammengefasst beträgt die Wärmeproduktion für das Warmwasser 167'386 [kWh]. Der Warmwasserverbrauch wird mit 2105.9 kWh pro Jahr angegeben. Somit entfallen auf einen m³ Warmwasser 79.5 [kWh], was sehr hoch ist.

Die elektrische Energieaufnahme für die Warmwasserbereitung setzt sich zusammen aus der Energieaufnahme der Warmwasser-Wärmepumpe und der elektrischen Energie der Heizwärmepumpe, die

⁴² Gemäss Planung beträgt die Jahresarbeitszahl 2.86 resp. 2.90 im Arbeitspunkt 3/64°C. Im Sommer nehmen wir als mittleren Arbeitspunkt 12/50°C an. Damit erhalten wir eine geschätzte Wärmepumpen-Arbeitszahl von 4.5

in der Quellenwärme der Warmwasser-Wärmepumpe steckt. Im Sommerbetrieb entfällt letztere, dafür muss die elektrische Energieaufnahme der ARA-Pumpe einbezogen werden.

Bei der Abschätzung des Anteils der Elektroenergie in der Quellenwärme der Warmwasser-Wärmepumpen gehen wir vom gesamten Stromverbrauch in der Heizperiode 2007/08 von 139'904 [kWh] aus. Davon abzuziehen ist der Stromverbrauch der Warmwasser-Wärmepumpen von 50'201 [kWh].

Tab. 4: Energiebilanz der Warmwasser-Wärmepumpe

Position	Sommer	Winter	Total	Einheit
Wärmebedarf	69'744	97'642	167'386	[kWh/a]
Strombedarf Kompressoren	15'499	29'058	44'557	[kWh/a]
Strombedarf ARA-Pumpen	5'368	0	5'368	[kWh/a]
Strombedarf Nahwärmenetzpumpe	276	0	276	[kWh/a]
Strombedarf total	21'143	29'058	50'201	[kWh/a]
JAZ Warmwasser	3.30	3.36	3.33	
JAZ Kompressoren	4.50	3.36	3.76	

Nahwärmenetz

Das Nahwärmenetz verläuft vollumfänglich in den Tiefgaragen, die die einzelnen Gebäude verbinden. Die Temperaturen in den Tiefgaragen betragen etwa 15 °C. Man kann sich fragen, ob die Wärmeverluste des Nahwärmenetzes hier nicht als Nutzwärme betrachtet werden müssen. Die Ermittlung der Wärmeverluste im Nahwärmenetz hat insofern Bedeutung, als sie für die Bestimmung des Wärmebezugs der Warmwasserwärmepumpen aus dem Heizungsrücklauf benötigt werden.

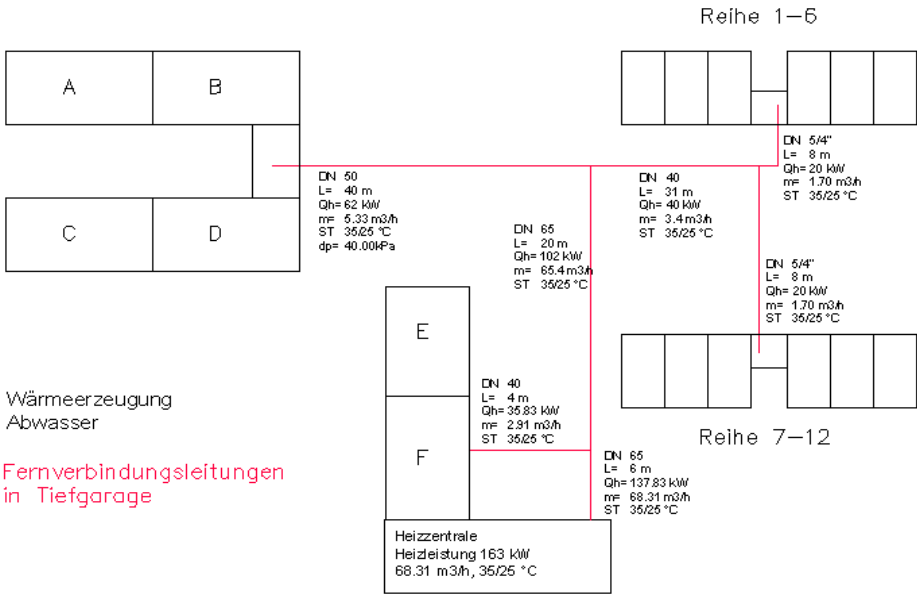


Abb. 3: Schematisiertes Nahwärmenetz

Die Wärmeabgabe des Nahwärmenetzes wurde anhand der Geometrie und der k-Werte des Netzes bestimmt und ergab 2'725 [kWh] und die benötigte Pumpenenergie 1014 [kWh].

Laufzeiten

Die Laufzeiten der ARA-Pumpen werden erfasst. Danach betrug die mittlere Laufzeit je Pumpe in der Periode vom 15.3.09 bis 26.5.09 durchschnittlich 17.5 Stunden pro Tag. Für 7 Monate ergeben sich hochgerechnet 3762 Stunden pro Pumpe.

Alle Warmwasser-Wärmepumpen zusammen liefern etwa 50.8 kW Wärmeleistung. Wenn man die Wärmeproduktion der Warmwasser-Wärmepumpen von 169'386 kWh durch diese 50.8 kW dividiert,

so erhält man 3336 Laufstunden oder 9.2 Stunden pro Tag. Dies ist ein sehr hoher Wert. Im Sommer ergibt sich eine Laufzeit der Warmwasser-Wärmepumpen von 1380 Stunden.

Die Heizwärmepumpe läuft bei 163.4 kW Wärmeleistung und einer Wärmeproduktion von 394'525 kWh mindestens 2414 Stunden oder 6.6 Stunden pro Tag. „Mindestens“ deshalb, weil sie auch Teillastbetrieb aufweist, was die Laufzeiten verlängert. Ohne Teillast käme man nicht auf die durchschnittlich 17.5 Stunden Laufzeit der ARA-Pumpen.

Für die Nahwärmenetzpumpen rechnen wir mit 5000 Laufstunden im Winter und 1380 Stunden im Sommer.

Die Verdampferpumpe der Heizungswärmepumpe läuft im Winter ebenfalls etwa 3762 Stunden.

Tab.5: Laufstunden

Pumpe	Laufzeit Sommer [h]	Laufzeit Winter [h]	Total [h]
ARA-Pumpen	1380	3762	5142
Verdampferpumpe	0	3762	3762
Nahwärmenetzpumpe	1380	5000	6380

Energiebilanz + JAZ

Die vorhandenen Messeinrichtungen (Elektro- und Wärmehzähler) sind auf die Heizkostenabrechnung ausgerichtet. Für unsere Zwecke müssen gewisse Rückrechnungen erstellt werden. Die Disposition der Messgeräte ist aus Abb. 3 ersichtlich. Die elektrische Energieaufnahme erfolgt einerseits über einen Elektrozähler, der alle Wärmepumpen und deren systembedingten Nebenantriebe und andererseits einen Zähler in der ARA, der die elektrische Energie der Abwasserpumpe erfasst.

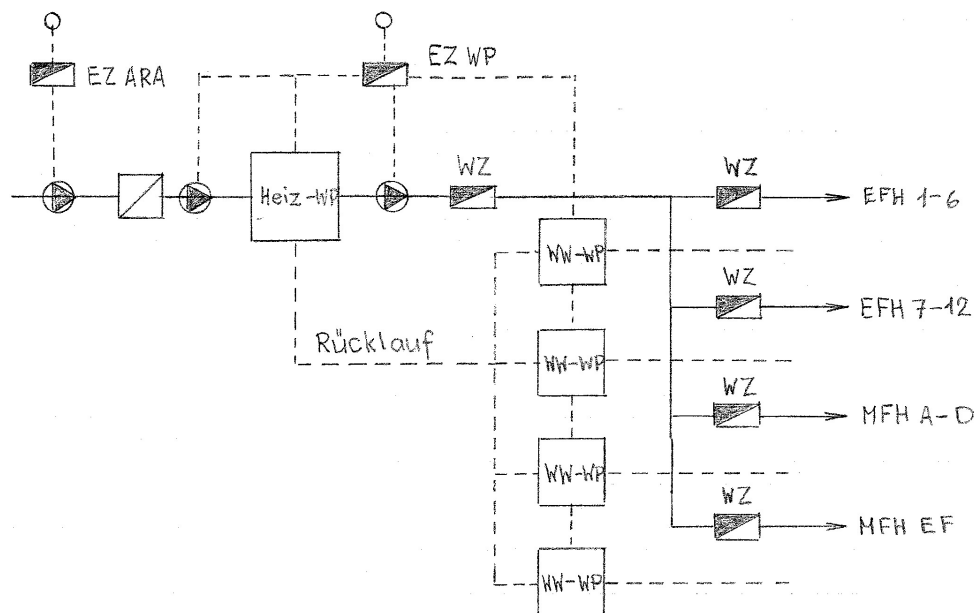


Abb. 4: Disposition der Messgeräte bei Anlage 4038

Man beachte, dass in Abb. 4 die Wärmeentnahme der Warmwasser-WP als Differenz zwischen dem WZ der Heiz-WP und den vier WZ der Unterstationen aufscheint.

Für die Analyse der energetischen Situation der Anlage stehen uns folgende Ablesedaten zur Verfügung:

Tab. 6: Wärmeproduktion und Energieverbrauch Anlage 4038

Zeile		1.7.2007 bis 30.6.2008	
1	Produzierte Wärme Heizwärmepumpe, brutto	394'525	[kWh]
2	Produzierte Wärme Warmwasser-WP, brutto	167'386	
3	Abzgl. Wärmebezug WW von Heiz-WP	79'219	
4	Netto-Wärmeproduktion Heiz-WP+WW-WP	482'692	
5	davon an Heizung	312'581	
6	davon Nahwärmenetzverluste	2'725	
7	davon Warmwasser	167'386	
8	Elektroverbrauch total	138'766	[kWh]
9	davon ARA-Pumpen	19'383	
10	Elektroverbrauch Wärmepumpen	119'904	
11	davon Kompressoren Heizwärme-WP	73'581	
12	davon Kompressoren WW-WP	44'557	
13	davon Verdampferpumpen	752	
14	davon Nahwärmenetzpumpe	1'014	
15	JAZ Gesamtanlage (Zeile 1/Zeile 2)	3.45	
16	JAZ Heizwärmepumpe (Zeile 1/Zeile 8)	5.36	
17	JAZ Heizung (Zeile 5/(Zeile 8-Verbrauch WW))	3.53	
18	JAZ Warmwasser (Tab. 4)	3.36	
19	Warmwasserverbrauch	2105.9	[m3]

Die Zeile 4 „Nettowärmeproduktion Heiz-WP+WW-WP“ umfasst die Wärmeproduktion der 5 Wärmepumpen abzüglich der internen Wärmelieferung der Heizwärmepumpe an die WW-Wärmepumpe.

Wirtschaftlichkeit

Investitionen

Tab. 7: Investitionen in die Heizanlage

Position	Werkverträge (inkl. 7.6 % WMSt)	Einheit
ARA-Pumpstation mit Fernleitung, Meteorleitung zu Töss	379'500	[Fr.]
Wärmeerzeugung WP Heizung	133'700	[Fr.]
Wärmeerzeugung WP Warmwasser (5)	74'000	[Fr.]
Fernleitung zu Unterstationen	42'000	[Fr.]
Total	629'200	[Fr.]
Investitionskosten pro kW installiert (Heiz-WP 163.4 kW, WW-WP 50.8 kW, Total 214.2 kW)	2937	[Fr/kW]
Investitionskosten kW Quellenanlage pro kW Heizleistung	1772	[Fr/kW]

Tab. 8: Betriebskosten, Wärmepreis

Position	1.7.07-30.6.08	Einheit
Energiekosten	34'528.60	[Fr]
Heizungsservice	9'331.10	[Fr]
Heizwartentschädigung	3120.00	[Fr]
Verwaltungshonorar 3%	1491.50	[Fr]
MWSt 7.6 % auf 1491.50	113.35	[Fr]
Total Heizkosten	48'584.55	[Fr]
Wärmepreis (ohne Kapitalkosten)	10.1	[Rp/kWh]

Der Kapitalkostenanteil wurde im Wärmepreis nicht berücksichtigt, da dieser von den gewählten Abschreibungsdauern und Zinssätzen abhängig ist. Da in Tab. 7 jedoch die Investitionen aufgeführt sind, kann der Kapitalkostenanteil jederzeit nach Massgabe der gewählten Parameter berechnet werden.

Erkenntnisse

1. Dank gedrängter Bauweise und dezentraler Warmwasserwärmepumpen sind die Verluste des Nahwärmenetzes gering.
2. Die ARA-Pumpen verbrauchen eine beträchtliche Menge Strom.
3. Die für den Winterbetrieb ausgelegten Nebenantriebe (ARA-Pumpe, Nahwärmenetz-UP) sind für den Sommerbetrieb überdimensioniert und verschlechtern die JAZ der Warmwasserversorgung.
4. Das Betriebskonzept der WW-WP sollte so ausgestaltet sei, dass alle WW-WP möglichst gleichzeitig arbeiten. Im Idealfall könnte der Stromverbrauch um 7500 kWh reduziert werden.
5. Die ARA-UP lief während der Anlagenbesichtigung auch ohne aktive Wärmepumpe. Ein Beispiel mehr, dass etwa ein Jahr nach Inbetriebnahme eine gründliche Analyse der Funktionsweise angezeigt wäre.