

Siedlungswerk Stuttgart

Bauvorhaben Wohnen am Schlossberg, Wärmeversorgung Kartäuser Straße in Freiburg

Nachhaltiges Heizsystem für ein innerstädtisches Baugebiet

Abschlussbericht

Gefördert durch den Innovationsfonds badenova
2008-16



Stuttgart, den 15. Juli 2013

Projektleitung:
Berichtverfassung und Projektbearbeitung:

Dr.-Ing. Boris Mahler
Dipl.-Ing. Michael Guigas

**EGS-plan, Ingenieurgesellschaft für
Energie-, Gebäude- und Solartechnik**

Gropiusplatz 10 · 70563 Stuttgart
Tel. 0711 / 99 007-5 · Fax 99 007-99

www.egs.plan.de
info@egs-plan.de

Bezugsquelle:

Energie-, Gebäude- und Solartechnik

Gropiusplatz 10 · 70563 Stuttgart

Tel. 0711 / 99 007-5 · Fax 99 007-99

www.egs-plan.de

info@egs-plan.de

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	6
2	Projektbeschreibung und Zielsetzung	7
2.1	Baugebiet „Wohnen am Schlossberg“	7
2.2	Energiekonzept.....	8
3	Aufbau und Funktionsbeschreibung der Anlage zur Wärmeversorgung.....	10
3.1	Heizzentrale.....	10
3.2	Wärmeverteilnetz und Hausstationen	14
3.3	Hauptkomponenten der Wärmeversorgung	14
3.3.1	Grundwasserbrunnen und Rigole	14
3.3.2	Wärmepumpe	17
3.3.3	Holzpelletskessel.....	18
3.3.4	MSR-Technik.....	18
4	Umsetzung	21
4.1	Baugebiet	21
4.2	Nahwärmeversorgung.....	22
4.2.1	Heizzentrale und Wärmeverteilung	22
4.2.2	Anlage zur Grundwassernutzung	23
4.2.3	Wasserkraftanlage.....	24
5	Baukosten.....	26
6	Zeitplan.....	27
7	Monitoring.....	28
7.1	Wärmepumpe	28
7.2	Wasserkraftanlage.....	31
7.3	Hydraulik Nahwärmeverteilnetz und Wärmeübergabestationen	32
7.4	Wärmebilanz.....	34
7.5	Kühlung	35
7.6	CO ₂ - Emissionen	37
8	Betriebsoptimierung.....	38
9	Zusammenfassung und Empfehlungen.....	41
10	Veröffentlichungen.....	43

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Lageplan Baugebiet „Wohnen am Schlossberg“ und Prinzipschema Wärmeversorgung jeweils Stand Energiekonzept.	8
Abbildung 2: CO ₂ -Emissionen der untersuchten Varianten für die Wärmeversorgung	9
Abbildung 3: Anteile der Wärmeerzeuger an der Wärmeversorgung „Kartäuser Straße“ ...	10
Abbildung 4: Hydraulik- und Funktionsschema der Wärmeversorgung Terrot-Areal	11
Abbildung 5: Berechnete Grundwassertemperaturen bei Entnahme aus dem Coats- Brunnen über 3,5 Jahre	12
Abbildung 6: Bestehender Grundwasserbrunnen „Coats“	15
Abbildung 7: Ausführungspläne der Rigole zur Grundwasserversickerung (Grundriss und Schnitt)	16
Abbildung 8: Elektrische Wärmepumpe ca. 100 kW, 4-stufig	17
Abbildung 9: Holzpelletskessel 540 kW und Einbau Schrägboden	18
Abbildung 10: Anlagenschemata Heizzentrale (Wärmepumpe, Holzkessel, Wärmeverteilung und Pufferspeicher an der GLT in der Heizzentrale.....	19
Abbildung 11: Anlagenschemata Hausstation(en) und Wasserkraftschnecke an der GLT in der Heizzentrale	20
Abbildung 12: Lageplan Baugebiet Terrot Areal mit Nahwärmeversorgung	21
Abbildung 13: Blick in den Heizraum mit installierter Heizzentrale	22
Abbildung 14: Hausstation mit Warmwasserspeicher	23
Abbildung 15: Grundwasser-Wärmetauscher in der Heizzentrale mit ohne Isolierung	23
Abbildung 16: Bestehender Grundwasserbrunnen „Coats“ mit neuer Grundwasserpumpe und fertiggestellter Brunnen.....	24
Abbildung 17: Bau der WKA mit trockengelegtem Kanal (Bachabschlag) und die fertiggestellte Bautechnik Gebäude, Streichwehr, Schütz und Leerschuss mit wieder gefülltem Kanal	25
Abbildung 18: Anlieferung und Einbau der Wasserkraftschnecke	25
Abbildung 19: Fertiggestellte WKA und Wasserkraftschnecke in Funktion	26
Abbildung 20: Zeitplan aus dem Förderantrag Stand 2008 und Stand Anfang 2013.....	27
Abbildung 21: Kennfeld der Wärmepumpe (Angaben des Herstellers mit COP und Messpunkten im Betrieb	28
Abbildung 22: Kennfeld der Wärmepumpe (Angaben des Herstellers) mit Heizleistung und Messpunkten im Betrieb	29
Abbildung 23: Messwerte der Jahresarbeitszahl und der monatlichen Arbeitszahlen der Wärmepumpe und der Abwasser- und Außentemperatur	30
Abbildung 24: Messwerte der Grundwassertemperatur 2011 und 2012 (Eintritt Grundwasser-Wärmetauscher)	30
Abbildung 25: Messwerte Vor- und Rücklauftemperaturen und Durchfluss im Heiz- / Kühlnetz und Warmwassernetz	32

Abbildung 26: Messwerte der Verluste in der Heizzentrale und in den Wärmeverteilnetzen Heiz- / Kühlnetz und Warmwassernetz, Bezug: Eingespeiste Wärmemenge Erzeuger	33
Abbildung 27: Anteile der in die Netze eingespeiste Wärme- / Kältemenge	34
Abbildung 28: Anteile der Wärmeerzeuger an der Wärmeversorgung	34
Abbildung 29: Anteile der in die Netze eingespeiste Wärme- / Kältemenge	35
Abbildung 30: Überprüfung Kühlbetrieb im Sommer 2012, Messwerte der Außentemperatur, Kühlleistung und der Raumtemperaturen	36
Abbildung 31: Gleichzeitiger Betrieb von Kühlung Wärmepumpe	37
Abbildung 32: CO ₂ – Emissionen für das Betriebsjahr 2012 aus den Messungen.....	37
Abbildung 33: Messwerte Stromverbrauch der Wärmepumpe und Stromproduktion der Wasserkraftanlage.....	38
Abbildung 34: Auslastung der Wärmeerzeuger.....	39
Abbildung 35: Wärmeerzeugungskosten (Energie + Wartung) der unterschiedlichen Wärmeerzeuger.....	40
Abbildung 36: Jährliche Wärmeerzeugungskosten (Energie und Wartung) Ist-Zustand und Optimierung.....	41
Tabelle 1: Vergleich der Kostenschätzung 2007 und den vorläufig abgerechneten Baukosten ohne Planungs- und Gemeinkosten, ohne Förderbeiträge Stand Ende Januar 2013 (alle Kosten sind brutto inkl. Mehrwertsteuer!).....	26

Begriffe, Abkürzungen und Definitionen

AZ	Arbeitszahl = Verhältnis von erzeugter Wärmemenge zu verbrauchter Strommenge einer Wärmepumpe
COP	Coefficient of Performance = Kennwert einer Wärmepumpe = Verhältnis momentan abgegebene Wärmeleistung zu momentan aufgenommener Stromleistung
DDC	Direct Digital Control = Regelungstechnisches Verfahren
DN	Nenndurchmesser von Rohrleitungen
EnEV	Energieeinsparverordnung
Gemis	Globales Emissions-Modell integrierter Systeme
GLT	Gebäudeleittechnik
JAZ	Jahresarbeitszahl = Verhältnis von erzeugter Wärmemenge zu verbrauchter Strommenge einer Wärmepumpe pro Jahr
WKA	Wasserkraftanlage

1 Zusammenfassung

Im Projekt „Wärmeversorgung Kartäuser Straße“ für das Bauvorhaben „Wohnen am Schlossberg“ wurde die Wärmeversorgung mit **elektrischer Wärmepumpe**, Wärmequelle **Grundwasser**, **Holzpelletskessel** und **Wasserkraftanlage** realisiert. Das Bauvorhaben beinhaltet die Neubebauung eines innerstädtischen Gewerbeareals mit Mehrfamilienhäusern, einem Kinderwohnheim und einem Gebäude mit Gewerbenutzung. Insgesamt sind etwa 14.500 m² Wohn-/Nutzfläche entstanden. Alle Gebäude wurden mit gutem Wärmeschutz entsprechend KfW60 gebaut.

Die sorgfältige und detaillierte Planung ist die Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung und den späteren optimalen Betrieb von derartigen Anlagen. Grundsätzlich wird empfohlen für die Wärmepumpe in der Leistungsbeschreibung ein Kennfeld vorzugeben und die Leistung im Betrieb zu überprüfen. Der Einbau der dafür benötigten Messtechnik ist in jedem Fall sinnvoll und zu empfehlen. Zusätzlich sollten zur Betriebsoptimierung mindestens im ersten Betriebsjahr detaillierte Messungen an der Anlage durchgeführt werden. Dazu wird der Einbau eines Monitoringsystems mit Fernüberwachung, das kostengünstig in die Mess-, Steuer- und Regeltechnik integriert werden kann, empfohlen.

Die Umsetzung des Projektes begann 2009 mit den ersten Hochbauten und war inkl. Anschluss der Gebäude im zweiten Bauabschnitt zum Sommer 2012 abgeschlossen. Die Inbetriebnahme der Anlage zur Wärmeversorgung im Automatikbetrieb war im Januar 2010. Die abgerechneten Baukosten liegen mit ca. 1.030 T€ brutto ca. 115 T€ unter der Kostenschätzung von 2007.

Die Leistungsfähigkeit der Komponenten Wärmepumpe und Grundwasserwärmetauscher wurde im Betrieb überprüft und erfüllt jeweils die Anforderungen entsprechend Leistungsverzeichnis. Mit Ausnahme der Wasserkraftanlage läuft die Anlage seit Inbetriebnahme weitgehend störungsfrei. Häufige Betriebsstörungen durch Schmutz im Kanal, eine geringere Stauhöhe als geplant und die Reduzierung der Drehzahl aufgrund von Schallproblemen haben zu einer geringeren Stromlieferung durch die Wasserkraftanlage geführt.

Die Betriebsergebnisse aus den ersten beiden Betriebsjahren sind positiv. Die Vorgaben aus dem Energiekonzept bzgl. CO₂-Emissionen werden eingehalten bzw. übertroffen. Der gemessene Deckungsanteil des innovativen Anlagenteils mit Wärmepumpe und Grundwassernutzung ist etwas geringer als im Energiekonzept. Der Anteil kann zukünftig durch Anpassung der Sollwerte in der Steuerung auf die Werte im Energiekonzept erhöht werden. Die Nutzung der lokalen Ressource Wasserkraft, der Einsatz von intelligenter Technik und eine innovative Wärmeverteilung mit niedrigen Temperaturen reduziert im Vergleich zur Beheizung mit Gas die CO₂ - Emissionen um ca. 97 % bzw. ca. 248 Tonnen pro Jahr. Die Versorgung erfolgt zu fast 100 % regenerativ.

2 Projektbeschreibung und Zielsetzung

Auf dem ehemaligen Gewerbegelande der Firma Mez später Firma Coats in Freiburg wurde ein neues Baugebiet mit dem Namen „Wohnen am Schlossberg“ gebaut. Bauträger ist das Siedlungswerk Stuttgart. Die Gebäude wurden vom Architekturbüro Ackermann & Raff geplant. Das Ingenieurbüro EGS-plan wurde vom Siedlungswerk Stuttgart mit der Erarbeitung eines Energiekonzeptes für die Versorgung der Gebäude mit Wärme für Heizung und Warmwasser beauftragt. Ziel war die Minimierung des Primärenergiebedarfes und der CO₂-Emissionen für die Wärmeversorgung bei vergleichbaren Jahresgesamtkosten und maximalem thermischem Komfort in den hochwertigen Wohnungen. Das Energiekonzept sollte in den Gebäudeentwurf integriert werden. Mit der Umsetzung des Energiekonzeptes sollte die Ausführung der Gebäude im KfW 60-Standard möglich sein.

2.1 Baugebiet „Wohnen am Schlossberg“

Abbildung 1 zeigt den Lageplan des Baugebietes „Wohnen am Schlossberg“. Im Baugebiet wurden acht Mehrfamilienhäuser mit 105 Eigentumswohnungen und einer Gesamtwohnfläche von ca. 10.400 m² gebaut. Zusätzlich entstanden ein Gebäude mit Gewerbenutzung mit ca. 2.000 m² Nutzfläche und ein Kinderwohnheim mit ca. 2.100 m² Wohn-/Nutzfläche.

Die Gebäude wurden in zwei Bauabschnitten erstellt. Der erste Bauabschnitt umfasst die Wohngebäude 1 bis 4, das Kinderheim und das Gebäude mit Gewerbenutzung. Die Wohngebäude Haus 5 bis 8 wurden im zweiten Bauabschnitt gebaut. Jeweils alle Gebäude in einem Bauabschnitt sind durch eine zusammenhängende Tiefgarage miteinander verbunden.

Am Baugebiet, das am Fuße des Schlossberges liegt, entlang verläuft ein Gewerbekanal, der für Stromerzeugung aus Wasserkraft genutzt werden kann. Zusätzlich befinden sich zwei Grundwasserbrunnen auf dem Gelände. Der eine Brunnen, der „Ganter-Brunnen“, gehört der Brauerei Ganter und wird momentan nicht aber ggfls. zukünftig genutzt. Der zweite Brunnen, der „Coats-Brunnen“, wurde von der Firma Coats genutzt. Dieser Brunnen stand zur Nutzung für das Baugebiet zur Verfügung und wurde im Energiekonzept entsprechend berücksichtigt.

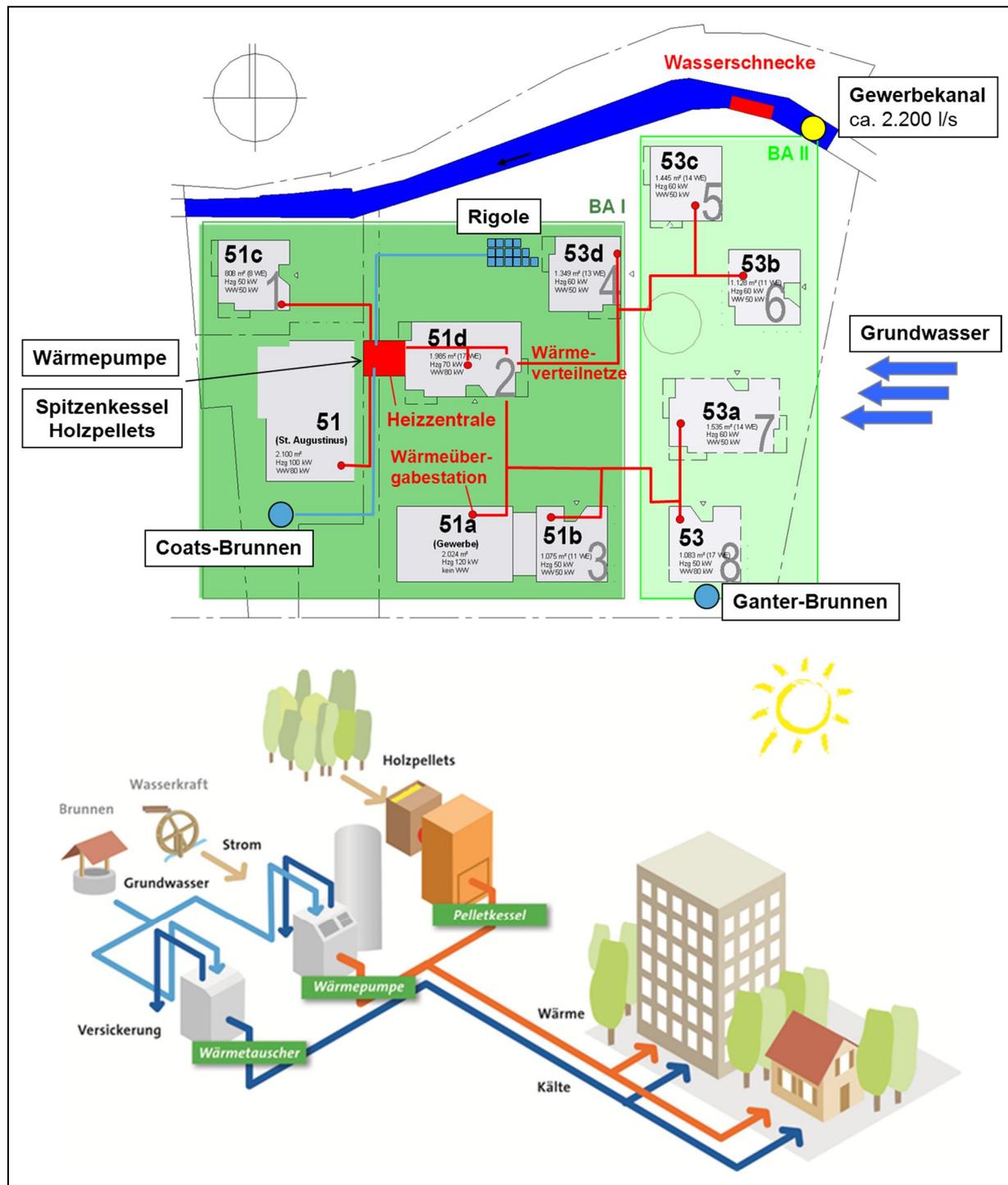


Abbildung 1: Lageplan Baugebiet „Wohnen am Schlossberg“ und Prinzipschema Wärmeversorgung jeweils Stand Energiekonzept.

2.2 Energiekonzept

Im Rahmen einer Energiekonzeptstudie wurden zu Anfang eine Vielzahl von Versorgungsvarianten in Verbindung mit einer zentralen Nahwärmeversorgung untersucht und mit der Referenzvariante „Dezentrale Gas-Brennwertkessel“ verglichen. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen zwei der Varianten im Vergleich mit der Referenzvariante. Auf Basis der Ergebnisse der Studie wurde beschlossen, die Variante mit **Elektrischer Wärmepumpe**

mit **Grundwasser** als Wärmequelle, **Holzpellets-(Spitzen)kessel** und **Wasserrad zur Stromerzeugung** zu realisieren. Diese Variante verbindet die Vorteile einer Wärmeerzeugung mit Nutzung der lokalen Ressourcen Grundwasser und Wasserkraft, relativ geringen Emissionen vor Ort mit einer großen Einsparung von Primärenergie bzw. CO₂-Emissionen von über 90 %, siehe Abbildung 2. Durch die Nutzung von Wasserkraft zur Erzeugung des Antriebsstromes für die Wärmepumpe und des CO₂-neutralen Brennstoffes Holzpellets erfolgt die Wärmeversorgung nahezu CO₂-neutral. Die Wärmeversorgung wird im Sommer ausschließlich mit der Wärmepumpe betrieben, ohne Emissionen vor Ort. Dies ist wichtig in Bezug auf die innerstädtische Lage des Baugebietes.

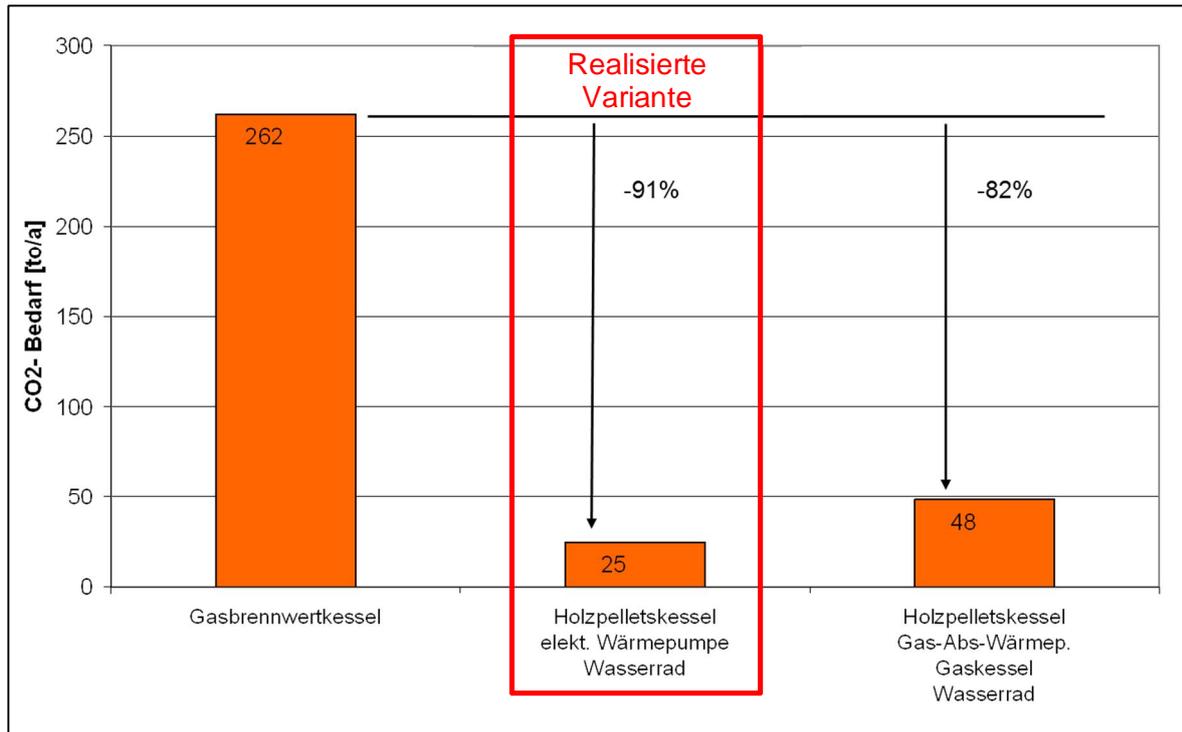


Abbildung 2: CO₂-Emissionen der untersuchten Varianten für die Wärmeversorgung

Die Abbildung 3 zeigt die Anteile der Wärmeerzeuger an der Wärmeversorgung. Bei der realisierten Variante **Holzpelletskessel, elektrische Wärmepumpe und Wasserrad** wird etwa 58 % der Wärme mit der Wärmepumpe erzeugt, die restlichen 42 % mit dem Holzpelletskessel.

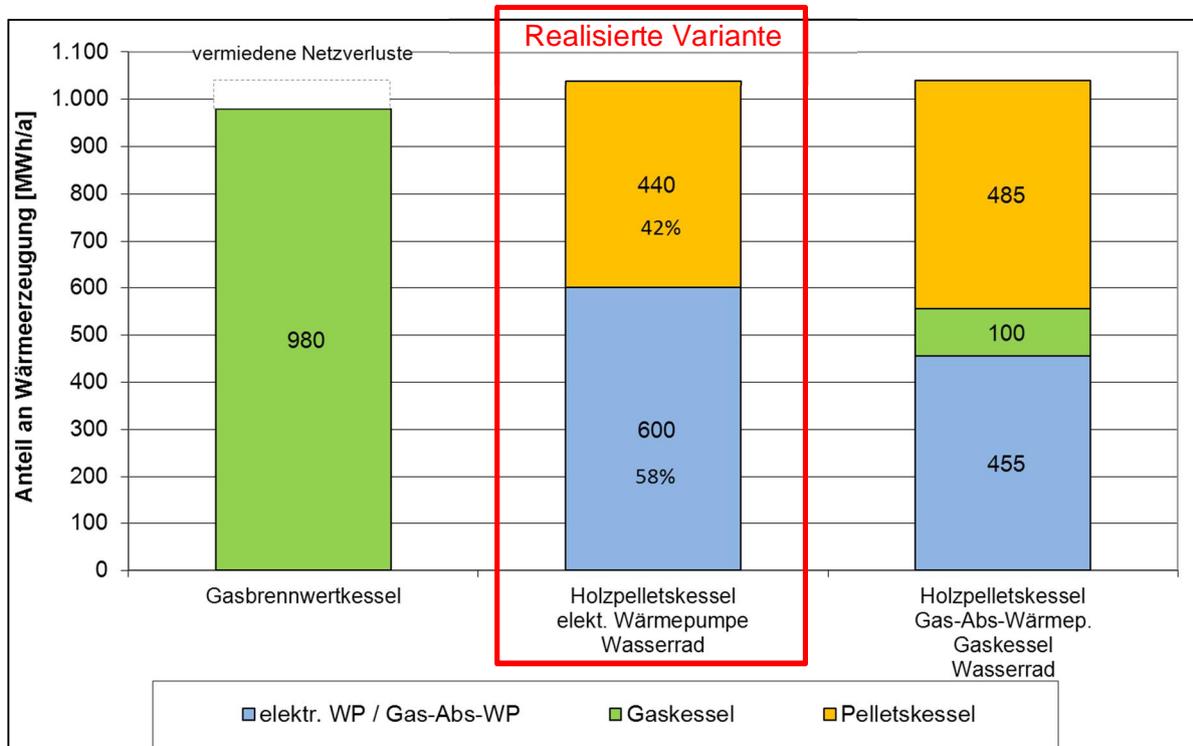


Abbildung 3: Anteile der Wärmeerzeuger an der Wärmeversorgung „Kartäuser Straße“

3 Aufbau und Funktionsbeschreibung der Anlage zur Wärmeversorgung

Betreiber der Nahwärmeversorgung ist die badenova Wärmeplus GmbH&Co.KG. Diese betreibt im Baugebiet eine Heizzentrale, aus der die Gebäude über ein Wärmeverteilnetz und Hausstationen mit Wärme für Heizung und Warmwasserbereitung versorgt werden. Das Ingenieurbüro EGS-plan wurde von badenova mit der Planung der Wärmeversorgung beauftragt.

3.1 Heizzentrale

Die Abbildung 4 zeigt das Hydraulik- und Funktionschema der Wärmeversorgung. Die Wärme für Heizung und Warmwasser wird durch mehrere Wärmeerzeuger bereitgestellt. Eine Wärmepumpe mit ca. 100 kW Heizleistung stellt die Grundlast zur Verfügung.

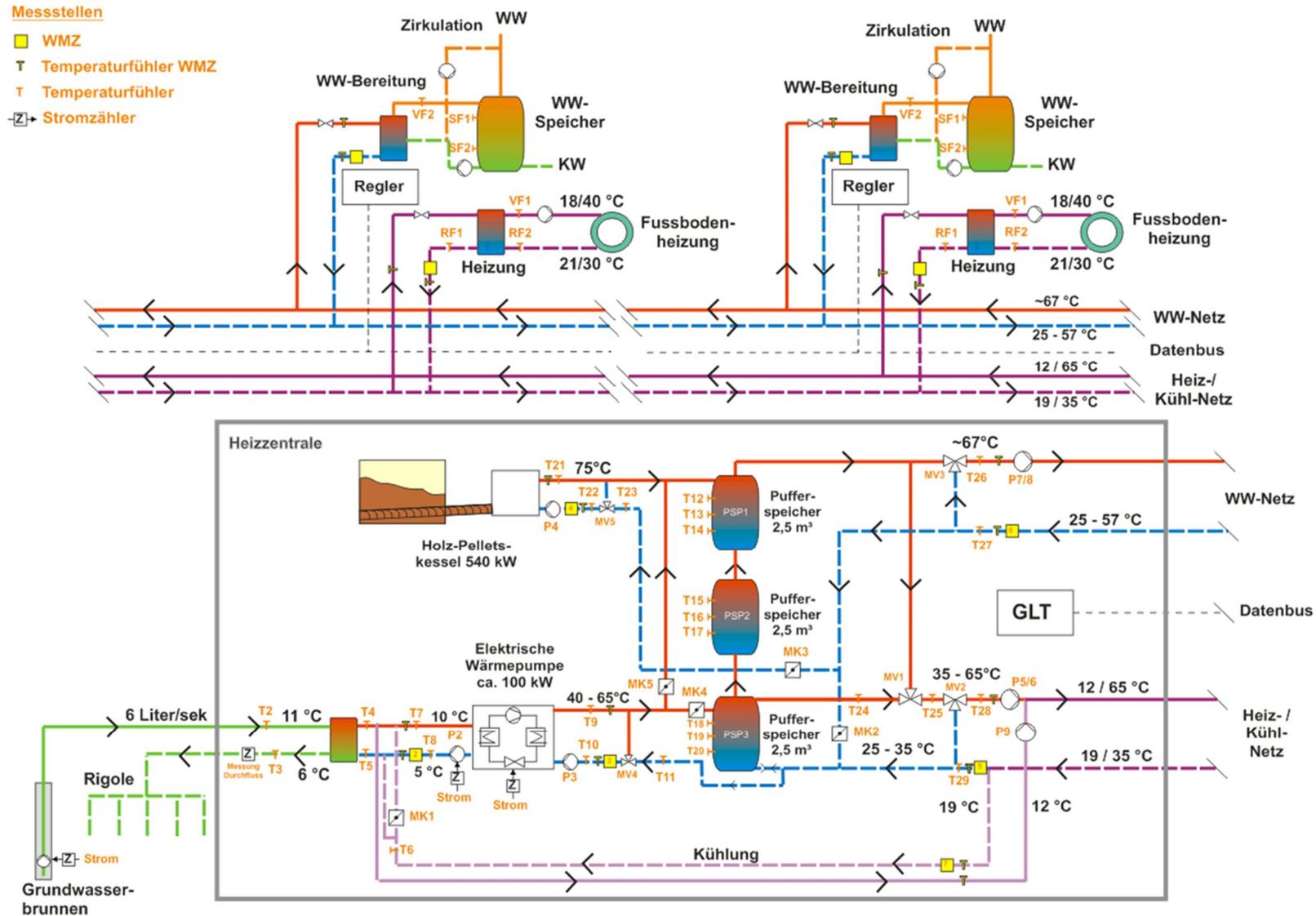


Abbildung 4: Hydraulik- und Funktionsschema der Wärmeversorgung Kartäuser Straße / Wohnen am Schlossberg

Als Wärmequelle wird Grundwasser verwendet. Dazu wurde der auf dem Grundstück vorhandene Grundwasserbrunnen („Coats-Brunnen“), der von der Firma Coats genutzt wurde, neu ausgebaut und an die Heizzentrale angeschlossen. Das Grundwasser wird in einer im Nordteil Baugebietes angeordneten Rigole wieder in den Boden eingeleitet. Es besteht die Möglichkeit, dass die Firma Ganter ihren Brunnen zukünftig noch nutzt. Aus diesem Grund wurden vorab hydrogeologische Untersuchungen durchgeführt, um die Ergiebigkeit des Coats-Brunnen mit und ohne Betrieb Ganter-Brunnen zu ermitteln. Das Ergebnis der Untersuchungen war, dass die Nutzung des Coats-Brunnen in beiden Fällen möglich bzw. unproblematisch ist.

Abbildung 5 zeigt die Prognose der Grundwassertemperaturen für den Zeitraum von 3,5 Jahren nur mit Betrieb des Coats-Brunnen, was dem aktuellen Zustand entspricht. Die Werte wurden aus Kurzzeitmessungen, die im Grundwasser durchgeführt wurden, berechnet. Die Grundwassertemperaturen schwanken geringfügig zwischen 10 °C und 11 °C. Aufgrund der ganzjährig relativ hohen Wärmequellentemperaturen sind mit der Wärmepumpe abhängig von der Heizungsvorlauftemperatur Arbeitszahlen (Verhältnis erzeugte Wärme zu eingesetztem Antriebsstrom) von über 4,0 erreichbar. Der Grundwasserkreis ist durch einen Wärmetauscher vom Verdampferkreis der Wärmepumpe getrennt.

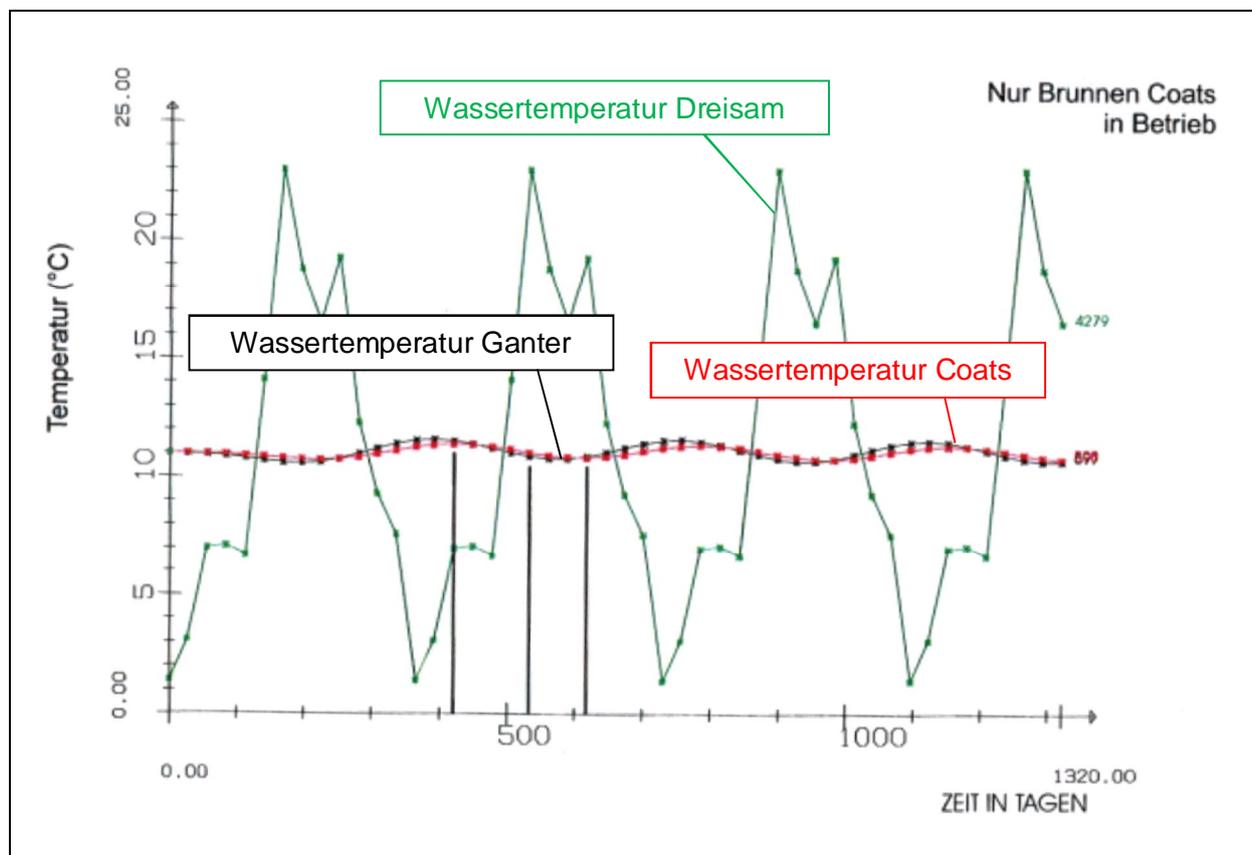


Abbildung 5: Berechnete Grundwassertemperaturen bei Entnahme aus dem Coats-Brunnen über 3,5 Jahre

Zur hydraulischen Entkopplung von Wärmeverbraucher und Wärmeerzeuger speist die Wärmepumpe in Pufferspeicher ein. Dadurch wird der Taktbetrieb der in vier Stufen regelbaren Wärmepumpe vermieden. Im Heizkreisrücklauf der Wärmepumpe ist ein Mischventil (MV1) eingebaut, mit dem die Temperatur im Heizkreisvorlauf der Wärmepumpe durch die Regelung eingestellt werden kann. Die Wärmeversorgung wird im Sommerbetrieb vollständig

mit der Wärmepumpe betrieben. Dazu speist die Wärmepumpe in alle drei Pufferspeicher mit einer konstanten Vorlauftemperatur von 65 °C ein. Die Pufferspeicher sind in Serie verschaltet. Der Holzpelletskessel mit 540 kW Nennleistung bleibt im Sommerbetrieb ausgeschaltet.

Im Heizbetrieb ist zusätzlich zur Wärmepumpe der Holzpelletskessel in Betrieb. Dieser speist in die beiden „heißen“ Pufferspeicher ein und hält diese auf einer Mindesttemperatur von ca. 75 °C. Die Wärmepumpe speist mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 40 °C in den „kalten“ Pufferspeicher ein.

Im Vorlauf der Wärmepumpe sind zwei Motorklappen eingebaut, die die Einspeisung in den jeweiligen Speicher steuern. Die Umschaltung zwischen Sommer- und Heizbetrieb erfolgt abhängig von der Außentemperatur.

Die Wärmeverteilung erfolgt mit zwei Verteilnetzen, dem **Heiz- und Kühlnetz** und dem **Warmwassernetz**.

Das Heiznetz, das im Sommerbetrieb abgeschaltet ist, wird hauptsächlich aus dem kalten Pufferspeicher, der von der Wärmepumpe beladen wird, gespeist. Die Vorlauftemperatur im Heiznetz wird außentemperaturgeführt zwischen 40 °C und maximal 65 °C eingestellt. Reicht die Temperatur aus dem kalten Pufferspeicher nicht aus, so wird Heizwasser aus dem heißen Pufferspeicher beigemischt. Das Heiznetz versorgt in den Übergabestationen die Gebäudeheizung. Das Heiznetz kann im Sommerbetrieb zusätzlich als Kühlnetz betrieben werden. Dazu wird über den Grundwasserwärmetauscher Kälte in das Heiz- / Kühlnetz eingespeist und die Gebäude über die Fußbodenheizkreise gekühlt. Die Vorlauftemperatur im Kühlnetz beträgt ca. 12 °C. Die Vorlauftemperatur in den Fußbodenheizkreisen der Gebäude wird zur Vermeidung von Tauwasserbildung auf der Fußbodenoberfläche in den Wohnungen auf minimal 18 °C eingestellt. Die Kühlung ist eine Raumtemperierung zur Komfortsteigerung. Aufgrund der geringen Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf von maximal 3 K ist die Kühlleistung begrenzt. Daher können keine maximalen Raumtemperaturen garantiert werden.

Das Warmwassernetz wird ganzjährig mit einer Vorlauftemperatur von ca. 65 °C betrieben und aus dem heißen Pufferspeicher gespeist. In den Übergabestationen wird jeweils die Warmwasserbereitung aus dem Warmwassernetz versorgt.

Die Aufteilung in zwei Verteilnetze hat den Vorteil, dass das Heiznetz über lange Zeit im Jahr mit niedrigen Temperaturen betrieben werden kann. Im Sommer werden die Gebäude mit Wärme für die Warmwasserbereitung aus dem Warmwassernetz versorgt und gleichzeitig können die Gebäude mit dem Heiz- / Kühlnetz mit Kälte zur Kühlung versorgt werden. Die Netzverluste mit zwei Verteilnetzen sind nur geringfügig höher als mit einem Netz, da das Heiznetz im Sommer abgeschaltet wird.

Der Rücklauf aus dem Heiznetz wird immer in den kalten Pufferspeicher unten eingespeist. Zur Erhaltung der Temperaturschichtung im „kalten“ Pufferspeicher wird der Rücklauf aus dem Warmwassernetz temperaturabhängig in den „kalten“ oder mittleren Pufferspeicher jeweils unten eingespeist. Die Umschaltung erfolgt über Motorklappen. Im Sommerbetrieb wird der Rücklauf aus dem Warmwassernetz immer in den „kalten“ Pufferspeicher unten eingespeist.

Der Antriebsstrom für die Wärmepumpe soll mit einer Wasserkraftanlage erzeugt werden, wodurch ein wesentlicher Teil der CO₂-Emissionen eingespart werden kann. Die Eigennutzung des erzeugten Stroms in der Heizzentrale zum Beispiel für den Antrieb der Wärmepumpe hätte wirtschaftliche Vorteile. Daher ist die direkte Stromeinspeisung in der Heizzentrale

rale vorbereitet. Der von der Wasserkraftanlage erzeugte Strom wird derzeit öffentliche Netz eingespeist. Die Wärmepumpe entnimmt den Strom für den Antrieb aus dem Netz. Die Stromerzeugung der Wasserkraftanlage wird daher nur bei der Primärenergiebilanz berücksichtigt.

3.2 Wärmeverteilnetz und Hausstationen

Niedrige Kondensationstemperaturen, das heißt niedrige Vorlauftemperaturen im Heizkreis der Wärmepumpe sind die Voraussetzung für hohe Arbeitszahlen und geringen Strombedarf von elektrischen Wärmepumpen. Der wirtschaftliche Betrieb von Wärmepumpen und nennenswerte Einsparungen an Primärenergie sind bei Einbindung von Wärmepumpen in Nahwärmeversorgungen nur dann erreichbar, wenn die Systemtemperaturen ausreichend niedrig sind. Aus diesem Grund ist es notwendig die Anlage zur Wärmeversorgung inkl. der Heizungsanlagen in den Gebäuden und die Warmwasserbereitung zu optimieren, um der Wärmepumpe die notwendigen niedrigen Rücklauftemperaturen zur Verfügung zu stellen.

Im Hydraulik- und Funktionsschema (Abbildung 4) ist der Aufbau der Wärmeverteilung und der Hausstationen dargestellt. Alle Gebäude werden über Fußbodenheizungen mit der Auslegung $40\text{ °C} / 30\text{ °C}$ (Vorlauftemperatur / Rücklauftemperatur) beheizt. Das Heiznetz ist auf maximal 65 °C Vorlauftemperatur und 35 °C Rücklauftemperatur ausgelegt. Im Heizbetrieb speist die Wärmepumpe ausschließlich in das Heiznetz ein und wird mit optimal niedrigen Temperaturen betrieben.

Die Warmwasserbereitung in den Stationen erfolgt mit Speicherladesystemen (Warmwasserspeicher mit externem Plattenwärmetauscher). In den Speichern wird entsprechend DVGW-Richtlinie Warmwasser mit 60 °C bereit. Die Warmwasserzirkulation wird direkt über den Wärmetauscher für die Speicherladung geführt. Damit wird im Gegensatz zur Standardeinbindung des Zirkulationsrücklaufes in den Speicher eine bessere Auskühlung im unteren Bereich der Speicher erreicht. Dies führt bei Speicherladung zur Absenkung der Rücklauftemperaturen im Wärmeverteilnetz. Das Warmwassernetz ist auf Vorlauftemperaturen von 65 °C ausgelegt. Je nachdem, welcher Betriebszustand in den Stationen überwiegt, der Speicherladebetrieb oder der Zirkulationsbetrieb, betragen die Rücklauftemperaturen im Warmwassernetz 45 °C bis 55 °C .

Die zentrale DDC-Regelung ist mit den Reglern der Wärmeübergabestationen über einen Datenbus vernetzt. Über den Datenbus kann die DDC in die Regelung der Stationen eingreifen, wodurch das Regelungsverhalten der Gesamtanlage optimiert werden kann. Spitzenlasten z.B. durch zeitgleiche Ladung aller Warmwasserspeicher oder Inbetriebnahme aller Heizungen am Morgen können so vermieden werden.

3.3 Hauptkomponenten der Wärmeversorgung

3.3.1 Grundwasserbrunnen und Rigole

In den bestehenden vollständig ausgebauten Brunnen, siehe Abbildung 6, wurde eine neue Grundwasserpumpe eingebaut, siehe. Der Brunnen wurde mit einer erdverlegten PE-Leitung an den Grundwasser-Wärmetauscher in der Heizzentrale angebunden.

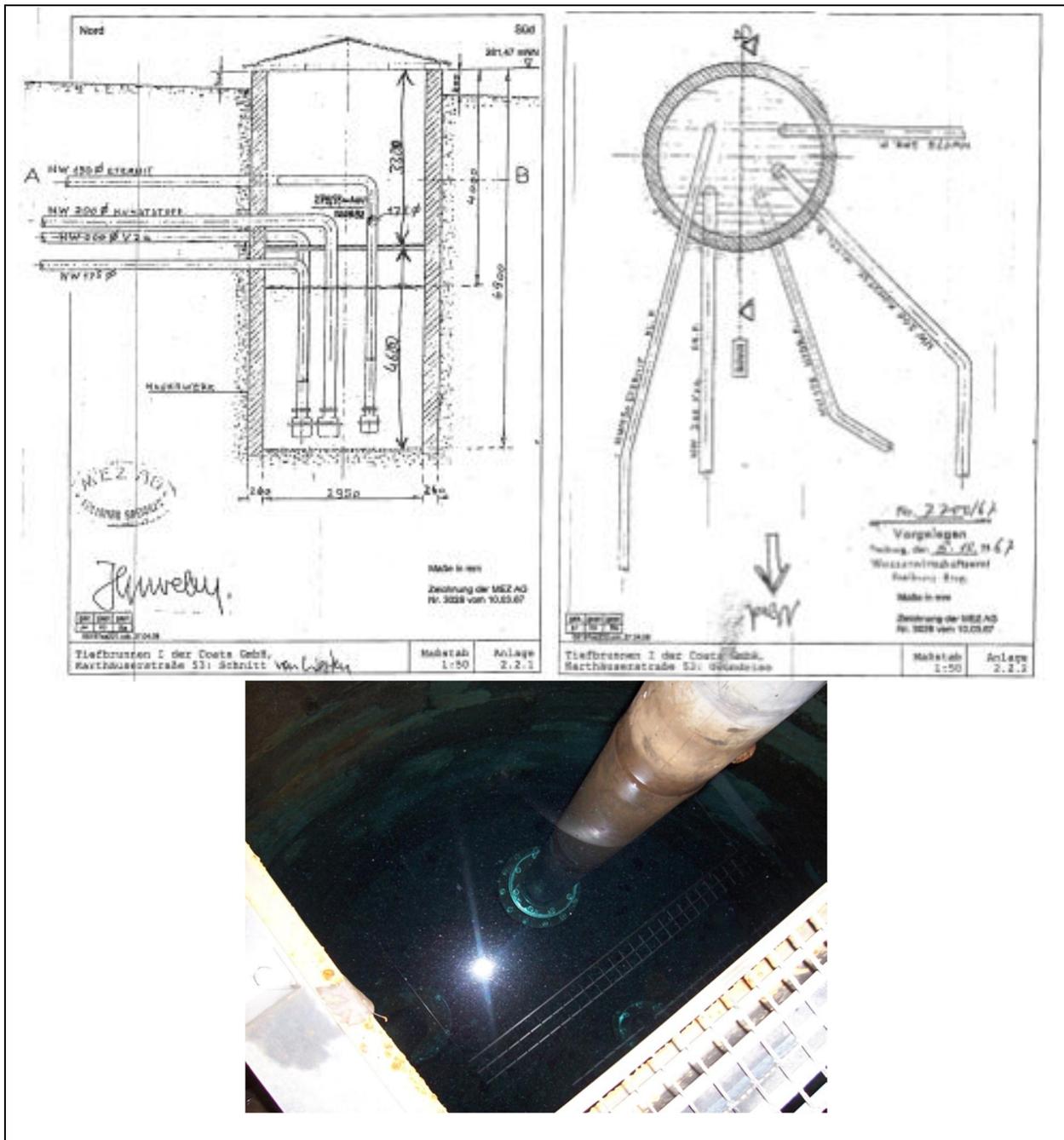


Abbildung 6: Bestehender Grundwasserbrunnen „Coats“

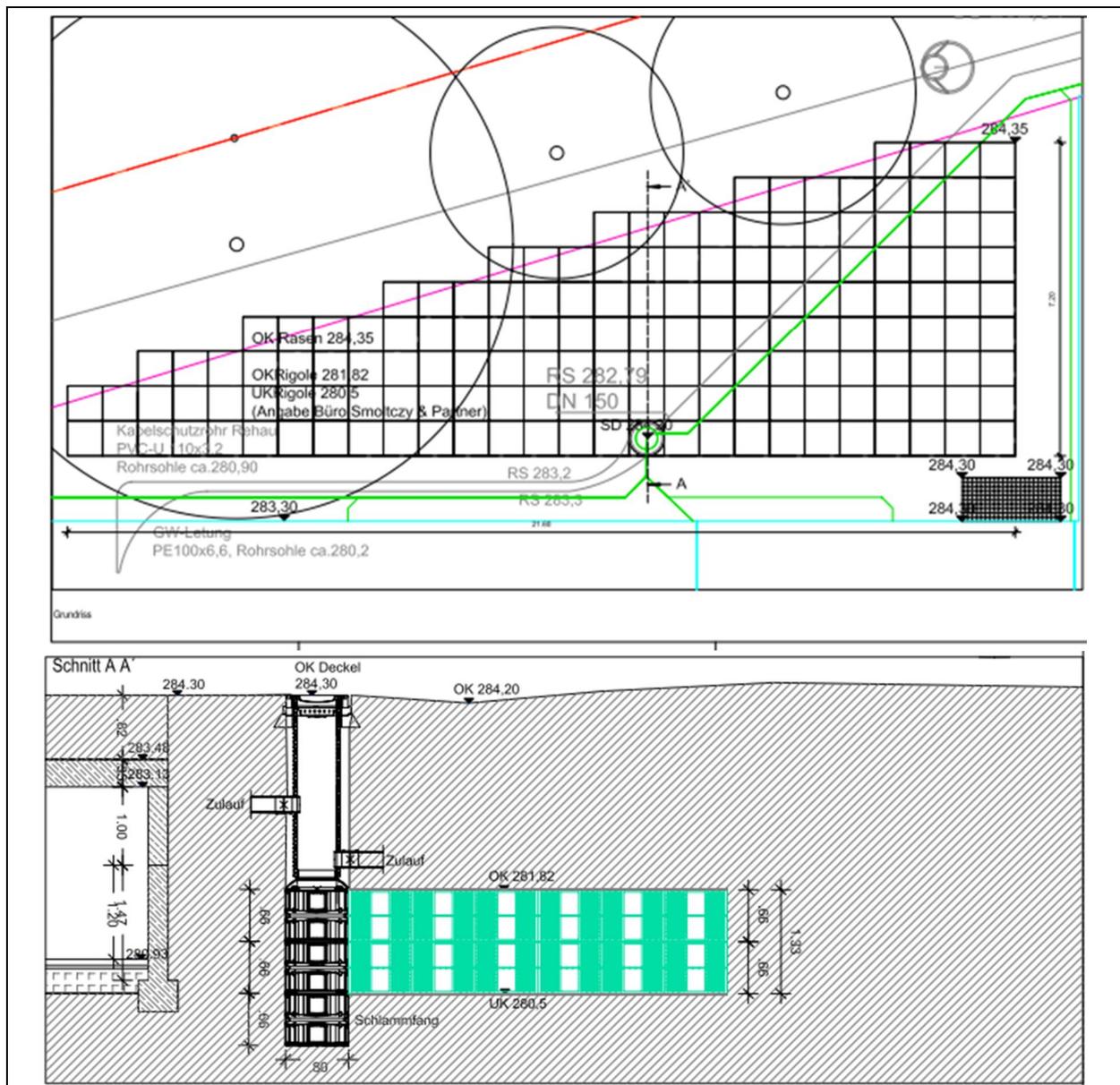


Abbildung 7: Ausführungspläne der Rigole zur Grundwasserversickerung (Grundriss und Schnitt)

Das abgekühlte oder bei Kühlung erwärmte Grundwasser wird in einer Rigole in den Boden eingeleitet. Die Abbildung 7 zeigt die Ausführungspläne (Grundriss und Schnitt) der Rigole. Die Rigole wird gleichzeitig zur Versickerung des im Baugebiet anfallenden Oberflächenwasser genutzt. Zur Anbindung der Grundwasserleitung und der Entwässerungsleitung an die Rigole wurde ein Schacht mit zwei Zuläufen gebaut. Der Zulauf für das Grundwasser aus der Heizzentrale wurde entgegen der Planung in Abbildung 7 weiter unten in den Schacht eingebaut. Dadurch kann die Grundwasserleitung aus der Heizzentrale leerlaufen und der notwendige Pumpendruck konnte reduziert werden. Die Oberkante der Rigole liegt ca. 2,4 m unter Geländeoberkante und ist ca. 1,3 m hoch. Der Abstand der Rigole zur Tiefgarage beträgt ca. 3 m.

Grundwasserbrunnen und Rigole sind auf eine Grundwassermenge von ca. 21 m³/h (= 6 Liter/Sek) ausgelegt.

Nachfolgend sind die Auslegungsdaten für den Grundwasser-Wärmetauscher angegeben:

A) Betrieb als Wärmequelle für die Wärmepumpe:

- Leistung 75 kW,
- Primärseite (Grundwasser):
Ein- / Austrittstemperatur 11 °C / 8,02 °C, Durchfluss 21,6 m³/h
- Sekundärseite (Verdampferkreis Wärmepumpe):
Ein- / Austrittstemperatur 5 °C / 10,0 °C, Durchfluss 12,9 m³/h

B) Betrieb Kühlung:

- Leistung 125 kW,
- Primärseite (Grundwasser):
Ein- / Austrittstemperatur 11 °C / 16,0 °C, Durchfluss 21,6 m³/h
- Sekundärseite (Kühlnetz):
Ein- / Austrittstemperatur 19,42 °C / 12,0 °C, Durchfluss 14,5 m³/h

3.3.2 Wärmepumpe

Ausgeschrieben war eine 4-stufige elektrische Wärmepumpe mit ca. 100 kW Leistung bei Verdampfereintritt (Vorlauf Wärmequelle) von 10 °C und Kondensatoraustritt (Vorlauf Heizkreis) von 55 °C. Als Kältemittel kommt R134a zum Einsatz. Die 4-stufige Maschine ist mit zwei Kältemittelkreisläufen und zwei 2-stufigen Verdichtern ausgestattet. Die Steuerung der Maschine erfolgt durch die eigene Regelung, die im Aggregat integriert ist. Ausgeschrieben war ein Stromzähler zur Messung der Stromaufnahme der Wärmepumpe und Ermittlung der Leistungsfähigkeit und der Arbeitszahl der Anlage. Die Maschine ist kompakt aufgebaut und zusammen mit dem Schaltschrank, der die Steuerung enthält, auf einem Montagerahmen mit den Maßen 1,4 m x 2,0 m x 1,8 m (Breite x Tiefe x Höhe) untergebracht.



Abbildung 8. Elektrische Wärmepumpe ca. 100 kW, 4-stufig

3.3.3 Holzpelletskessel

Für die Deckung der Mittellast und der Spitzenlast wurde ein Holzpelletskessel mit der Nennleistung von 540 kW eingebaut. Der Kessel ist in die beiden heißen Pufferspeicher eingebunden. Im Heizbetrieb wird der Holzpelletskessel sobald die Temperatur im Pufferspeicher oben nicht mehr für die Einspeisung in die Wärmeversorgung ausreicht, in Betrieb genommen.



Abbildung 9. Holzpelletskessel 540 kW und Einbau Schrägboden

3.3.4 MSR-Technik

Zur Regelung der Gesamtanlage wird eine zentrale Steuerung (DDC) mit Gebäudeleitzentrale (GLT) in der Heizzentrale eingesetzt, siehe Abbildung 10. Alle Wärmeerzeuger werden abhängig von den Temperaturen in den Pufferspeichern von der DDC in Betrieb genommen bzw. freigegeben. Die Regelung der Leistung der einzelnen Wärmeerzeuger erfolgt mit den separaten Steuerungen der Wärmeerzeuger. Die Regler der Wärmeübergabestationen sind über einen Datenbus mit der DDC in der Heizzentrale verbunden. Die Parameter in den Stationsreglern können so über die DDC in der Heizzentrale eingestellt werden und Regelungsfunktionen zentral über die DDC ausgeführt werden. Die Anlage kann über den DSL-Anschluss in der Heizzentrale fern überwacht werden. Störmeldungen werden automatisch per SMS an Mobiltelefone oder Email-Adressen weitergeleitet. Alle Messgeräte (Wärmemengenzähler, Gaszähler und Stromzähler) sind über M-Bus oder Impuls auf die GLT aufgeschaltet und werden an der GLT angezeigt. Für das Monitoring der Anlage werden zusätzlich alle Messwerte (alle Fühler aus der DDC + Wärmemengen, Strom und Gaszähler) im Zeitintervall von 15 Minuten in Dateien gespeichert und EGS-plan zur Auswertung zur Verfügung gestellt. In Abbildung 4 auf der Seite 11 sind alle Messstellen in der Anlage eingezeichnet.

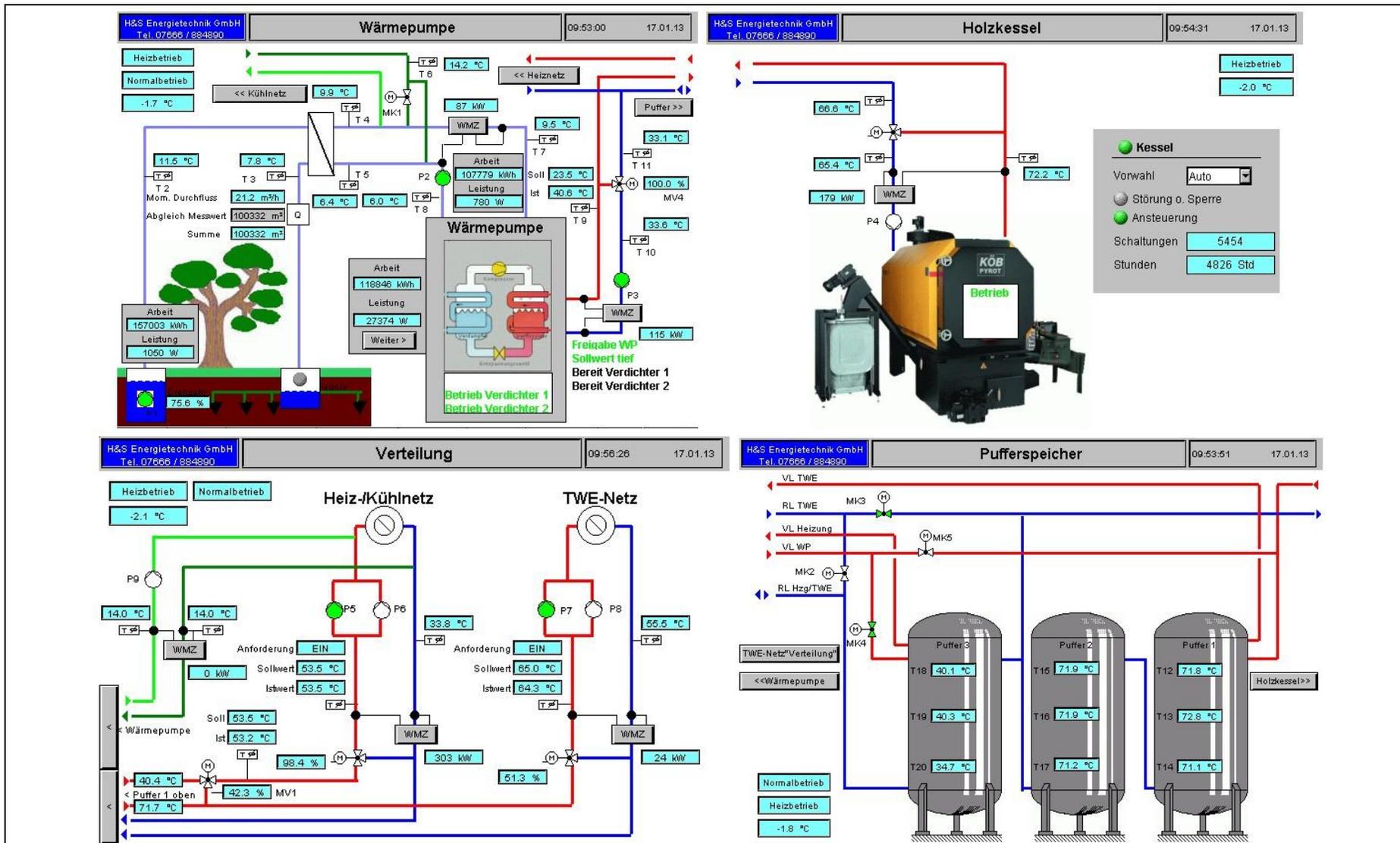


Abbildung 10: Anlagenschemata Heizzentrale (Wärmepumpe, Holzessel, Wärmeverteilung und Pufferspeicher an der GLT in der Heizzentrale)

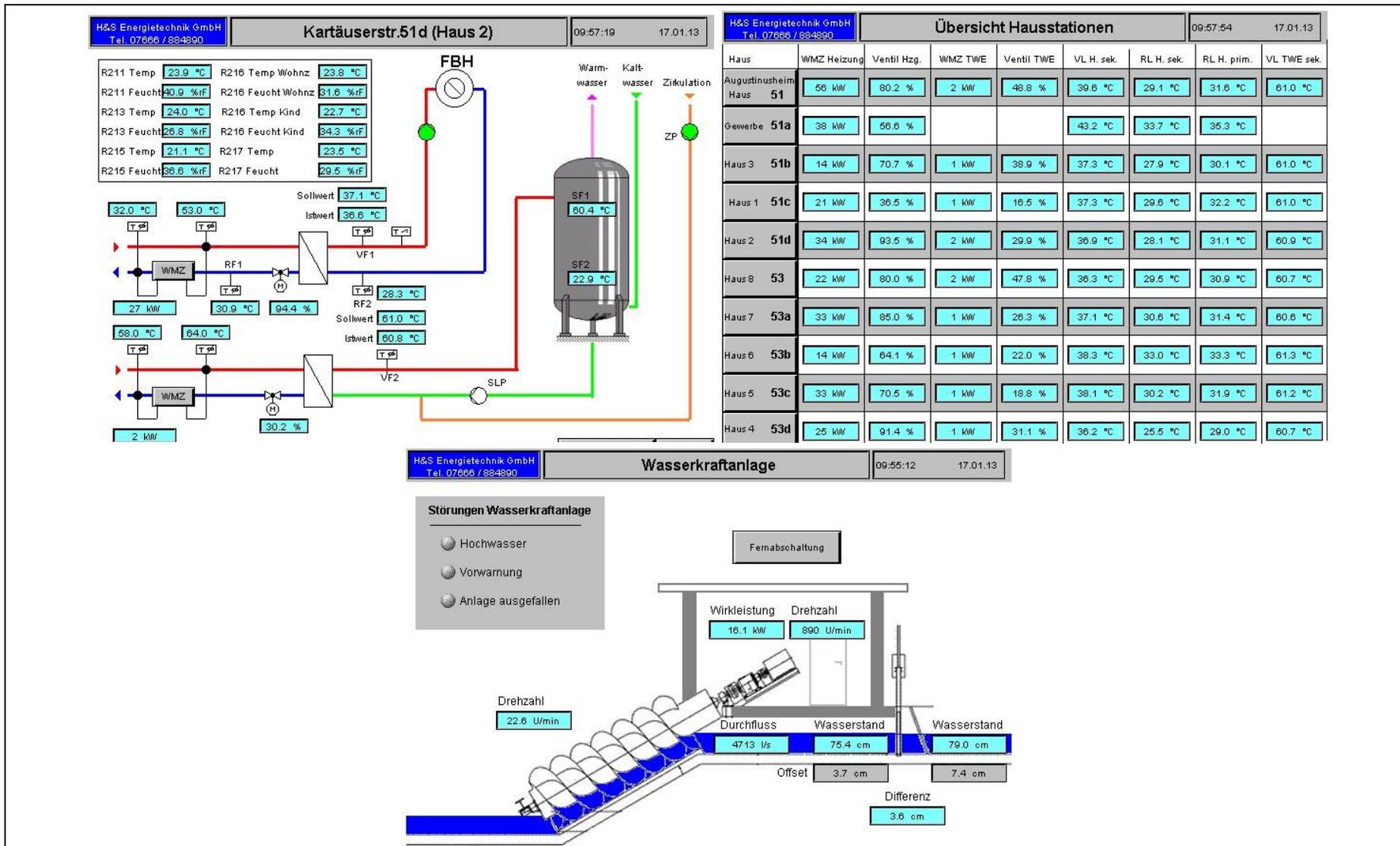


Abbildung 11: Anlagenschemata Hausstation(en) und Wasserkraftschnecke an der GLT in der Heizzentrale

4 Umsetzung

4.1 Baugebiet

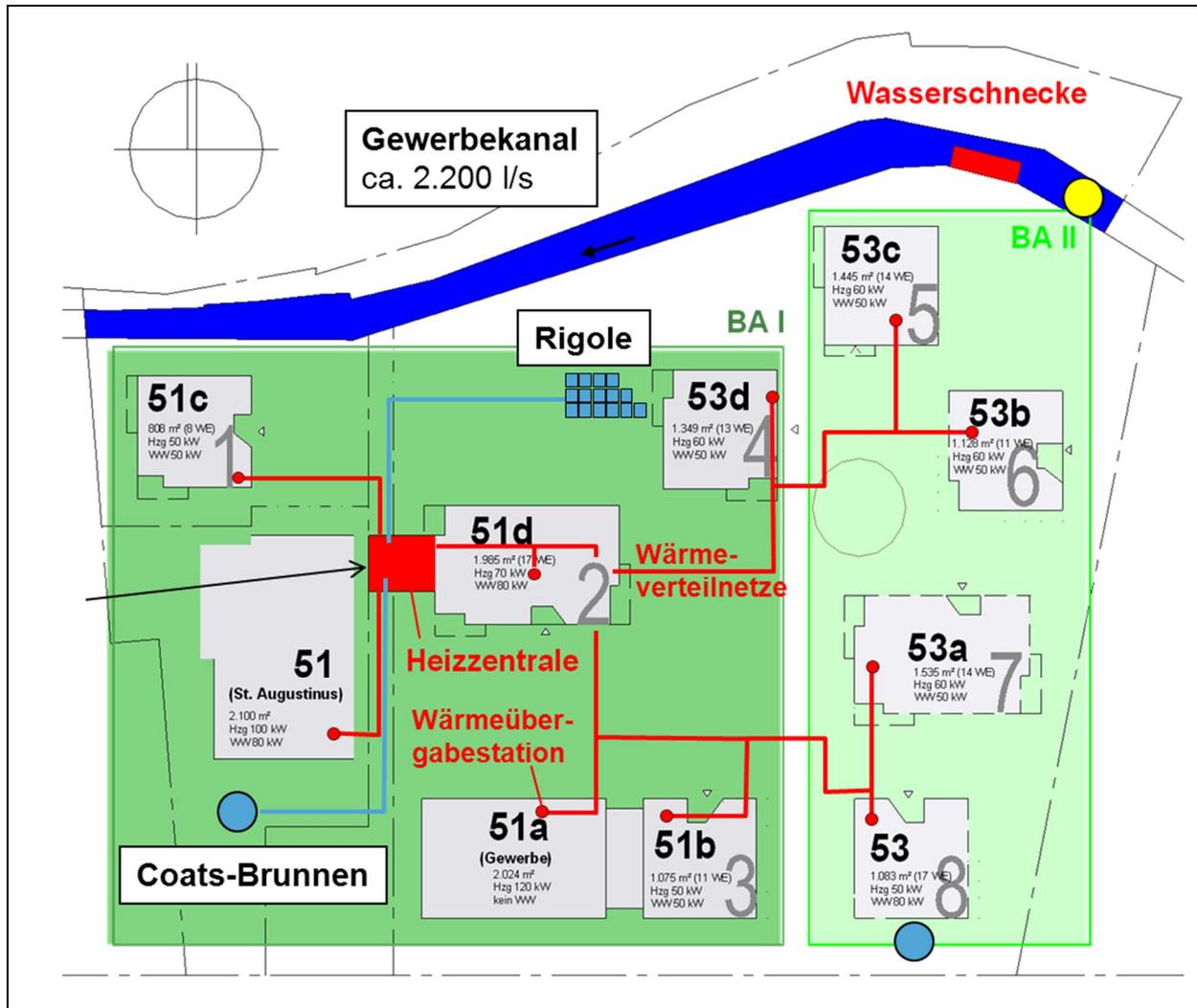


Abbildung 12: Lageplan Baugebiet Terrot Areal mit Nahwärmeversorgung

Das Baugebiet Wohnen am Schlossberg wurde in zwei Bauabschnitten erstellt. Der erste Bauabschnitt umfasst die Gebäude Haus 1 bis 4, das Kinderheim St. Augustinus und das Gebäude mit Gewerbenutzung. Mit dem Rohbau der Gebäude im ersten Bauabschnitt wurde im Frühjahr 2008 begonnen. Als erstes Gebäude wurde das Kinderheim St. Augustinus im Oktober 2009 bezogen. Die ersten Wohnungen in den Häusern 1 bis 4 wurden im Januar 2010 übergeben bzw. bezogen. Ende 2010 waren alle Wohnungen und das Gebäude mit Gewerbenutzung bezogen.

Mit dem Rohbau der Gebäude im zweiten Bauabschnitt (Haus 5 bis 8) wurde im Sommer 2010 begonnen. Die Estrichaufheizung in den Gebäuden dauerte von August bis Dezember 2011. Die ersten Wohnungen wurden im Februar 2012 übergeben und bezogen. Seit Sommer 2012 sind alle Wohnungen im ersten und zweiten Bauabschnitt bezogen. Im Vergleich zum Zeitplan im Förderantrag ergibt sich für die Hochbauten eine zeitliche Verschiebung von ca. 1 3/4 Jahren.

4.2 Nahwärmeversorgung

4.2.1 Heizzentrale und Wärmeverteilung

Der Raum für die Heizzentrale im Bereich der Tiefgarage im ersten Bauabschnitt wurde im Frühjahr 2009 fertig gestellt. Die Installationen in der Heizzentrale konnten im April 2009 beginnen. Dadurch ergibt sich im Vergleich zum Zeitplan im Förderantrag eine zeitliche Verschiebung von ca. 6 Monaten. Die Heizzentrale wurde bis Oktober 2009 installiert. Für die Bauheizung vom Kinderheim im Sommer 2009 wurde eine mobile Heizzentrale eingesetzt. Der Holzkessel wurde im Oktober 2009 in Betrieb genommen.



Abbildung 13: Blick in den Heizraum mit installierter Heizzentrale

Der Heizraum mit Wärmepumpe, Holzpelletskessel, Pufferspeicher, Wärmeverteilung und angrenzendem Holzpelletssilo wurde im Bereich der Tiefgarage gebaut, siehe Abbildung 13.

Parallel zur Installation der Heizzentrale wurde die Wärmeverteilung zu den Gebäuden, das Heiz- / Kühlnetz und das Warmwassernetz aufgebaut und die Hausstationen installiert. Abbildung 14 zeigt eine Hausstation mit Warmwasserspeicher. Die Hausstationen wurden auf Rahmen vormontiert angeliefert und in den Technikräumen im Untergeschoss der Gebäude aufgestellt und an die Wärmeverteilung angeschlossen. Aufgrund der Nutzung der Fußbodenheizung zur Kühlung ist das Heiz- / Kühlnetz und der Heiz- / Kühlstrang in den Stationen komplett mit feuchteunempfindlicher Weichschaumisolierung („Wärme- / Kälte-dämmung“) wärmege-dämmt.

Zur Estrichtrocknung und Bauheizung im Kinderheim wurde im Sommer 2009 eine mobile Heizzentrale eingesetzt, da die Heizzentrale, verursacht durch die späte Fertigstellung des Heizraumes, noch nicht komplett installiert bzw. in Betrieb war. Der Holzkessel ging Ende 2009 in Betrieb. Ende Januar 2010 wurden die Wärmepumpe und die MSR-Technik in Betrieb genommen. Die letzten Mängel in der MSR-Technik und im Monitoring konnten bis Ende Oktober 2010 beseitigt werden. Seit November 2010 läuft die Anlage störungsfrei und stehen alle Messdaten für die Auswertung zur Verfügung.

Die ersten Gebäude im zweiten Bauabschnitt sind seit Juli 2011 an die Nahwärmeversorgung angeschlossen, wobei im Herbst 2011 ausschließlich Wärme für Estrichtrocknung und Bauheizung verbraucht wurde. Die Gebäude wurden im Frühjahr 2012 bezogen.



Abbildung 14: Hausstation mit Warmwasserspeicher

4.2.2 Anlage zur Grundwassernutzung



Abbildung 15: Grundwasser-Wärmetauscher in der Heizzentrale ohne bzw. mit Isolierung

Die Installationen im Grundwasserbrunnen wurden im Sommer 2009 durchgeführt. In diesem Zeitraum erfolgte auch der Bau der Rigole und die Anbindung von Grundwasserbrunnen und Rigole an die Heizzentrale. Die Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen Aufnahmen vom

Grundwasser-Wärmetauscher in der Heizzentrale und vom Einbau der Grundwasserpumpe und vom fertiggestellten Grundwasserbrunnen vor der Terrasse des St. Augustinusheims.



Abbildung 16: Bestehender Grundwasserbrunnen „Coats“ mit neuer Grundwasserpumpe und fertiggestellter Brunnen.

4.2.3 Wasserkraftanlage

Für die Ausführung der Wasserkraftanlage (WKA) standen unterschiedliche Bauformen / Anlagentypen zur Verfügung. Aufgrund der schwierigen Einhausung und der damit verbundenen Schallproblematik wurde die Ausführung als Wasserrad ober- oder unterschlächtig verworfen. Zur Ausführung kam eine sogenannte Wasserkraftschnecke. Durch den axialen Wasserdurchlauf (Umkehrprinzip der Archimedischen Schraube) kann die Wasserkraftschnecke relativ gut in einem Gebäude integriert werden und bietet damit den besten Schallschutz. Dieser ist aufgrund der Wohngebäude in unmittelbarer Nähe zur WKA (Entfernung ca. 8 m) von großer Bedeutung. Die Erfahrungen mit der WKA am Schlossberg haben gezeigt, dass die vertragliche Fixierung des Schallschutzes (Körper- und Luftschall) unbedingt empfehlenswert ist, da an diesem Punkt erheblicher Mehraufwand entstanden ist. In der Planungsphase sollte ein Bauphysiker / Akkustiker mit eingebunden werden. Weitere Vorteile gegenüber Wasserrädern sind die bessere Verträglichkeit von Wassermengenschwankungen, geringere Anfälligkeit bzgl. Treibgut und der bessere Wirkungsgrad. Wasserkraftschnecken sind grundsätzlich besser für geringe Stauhöhen geeignet. In Freiburg betrug diese laut Planung 1,3 m.



Abbildung 17: Bau der WKA mit trockengelegtem Kanal (Bachabschlag) und die fertiggestellte Bautechnik Gebäude, Streichwehr, Schütz und Leerschuss mit wieder gefülltem Kanal

Die Wasserkraftanlage wurde 2008 und 2009 gebaut. 2010 und 2011 wurden zusätzliche Schallschutzmaßnahmen eingebaut. Die Bautechnik bestehend aus Gebäude und Einbauten im Kanal wurden 2008 realisiert. Die Abbildung 17 zeigt den Einbau bei trockengelegtem Kanal (Bachabschlag) und die fertiggestellte Bautechnik mit Gebäude, Streichwehr, Schütz und Leerschuss mit wieder gefülltem Kanal. Um eine höhere Stauhöhe zu erreichen und als Hochwasserschutz wurde die Schutzmauer vor der WKA (flussaufwärts) erhöht.



Abbildung 18: Anlieferung und Einbau der Wasserkraftschnecke

Die Wasserkraftschnecke, siehe Abbildung 18, wurde 2009 eingebaut. Die Inbetriebnahme der Anlage war 2009. Der von der WKA erzeugte Strom wird ins Netz eingespeist. Wie bereits erwähnt ist die direkte Einspeisung in die Stromversorgung der Heizzentrale, das heißt die Versorgung der Wärmepumpe mit Strom aus der WKA, derzeit noch nicht realisiert. Die Abbildung 19 zeigt die fertiggestellte WKA mit außenseitiger Sichtverkleidung aus Holz des Gebäudes und die Wasserkraftschnecke in Funktion.

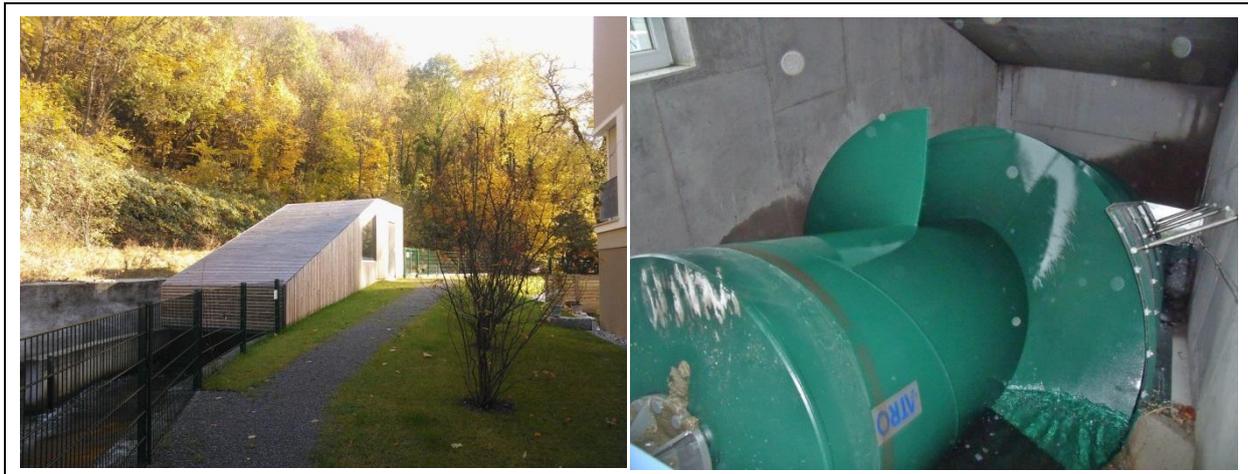


Abbildung 19: Fertiggestellte WKA und Wasserkraftschnecke in Funktion

5 Baukosten

Die Anlage ist mit Stand Ende Januar 2013 komplett abgerechnet. Die nachfolgende Tabelle 1 zeigt den Vergleich zwischen der Kostenschätzung im Rahmen der Vorplanung 2007 und den abrechneten Baukosten Stand Schlussrechnung Ende Januar 2013. Die Gesamtbaukosten für die Wärmeversorgung ohne Planungs- und Gemeinkosten und ohne Förderbeiträge liegen laut Abrechnung etwa 10 % unter der Kostenschätzung von 2007. Mehrkosten sind im Bereich Wärmeverteilung durch zum Teil längere Trassenführung und bei der Wasserkraftanlage entstanden. Die Investitionskosten für „Wärme-/Kältesteuerung wohnungsweise“ sind in den Baukosten für die MSR-Technik für die Gesamtanlage enthalten. Mehrinvestitionen für Raumthermostate mit Kühlfunktion und die Verkabelung im Gebäude sind nicht enthalten. Die Investitionskosten der Anlage wurden mit 235.000 € Brutto aus dem Innovationsfonds der Badenova AG gefördert.

	Kostenschätzung 2007	Abgerechnete Baukosten Stand Januar 2013
Holzpelletskessel 540 kW	171.500	131.000
Wärmepumpe, Brunnen, Leitungen	145.300	112.100
Verteilung und Übergabe	268.300	286.100
Wasserrad	374.900	397.200
Wärme-/Kältesteuerung wohnungsweise	154.700	82.000
Speichermanagement	29.750	21.300
Gesamtbaukosten	1.144.500	1.029.700

Tabelle 1: Vergleich der Kostenschätzung 2007 und den vorläufig abgerechneten Baukosten ohne Planungs- und Gemeinkosten, ohne Förderbeiträge Stand Ende Januar 2013 (alle Kosten sind Brutto inkl. Mehrwertsteuer!)

6 Zeitplan

Die Abbildung 20 zeigt den Zeitplan für das Projekt Wohnen am Schlossberg / Kartäuser Straße. Eingetragen sind die Balken für den Stand 2007 im Förderantrag (gelb) und den aktuellen Stand Anfang 2013 nach Projektende (grün). Durch den langen Bauzeitraum für die Erstellung der Gebäude insbesondere im zweiten Bauabschnitt ergibt sich eine zeitliche Verschiebung von ca. 1 3/4 Jahren. Die Messwerte aus den Übergabestationen im zweiten Bauabschnitt standen erst ab Januar 2012 zur Verfügung, so dass sich der Zeitplan für das gesamte Projekt um ca. 2 Jahre verschoben hat.

	2008				2009				2010				2011				2012			
	I	II	III	IV																
Planung	■	■																		
Planung		■	■	■																
Hochbau 1. Bauabschnitt		■	■	■	■	■														
Hochbau 1. Bauabschnitt		■	■	■	■	■	■	■												
Hochbau 2. Bauabschnitt						■	■	■	■	■										
Hochbau 2. Bauabschnitt											■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Installation Technik				■	■	■														
Installation Technik						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
Monitoring						■	■	■	■	■	■	■								
Monitoring													■	■	■	■	■	■	■	■

Abbildung 20: Zeitplan aus dem Förderantrag Stand 2008 und Stand Anfang 2013

7 Monitoring

7.1 Wärmepumpe

Im Leistungsverzeichnis wurde ein Kennfeld für die Wärmepumpe gefordert, welches dem Angebot für die Wärmepumpe beigelegt werden musste. Das Kennfeld beinhaltet neun Betriebspunkte mit unterschiedlichen Eintrittstemperaturen Verdampfer und Austrittstemperaturen Kondensator. Für jeden Betriebspunkt muss der Hersteller die Ein- und Austrittstemperaturen und thermischen Leistungen Verdampfer- und Kondensatorseitig sowie die aufgenommene elektrische Leistung und die Arbeitszahl COP der angebotenen Wärmepumpe angeben.

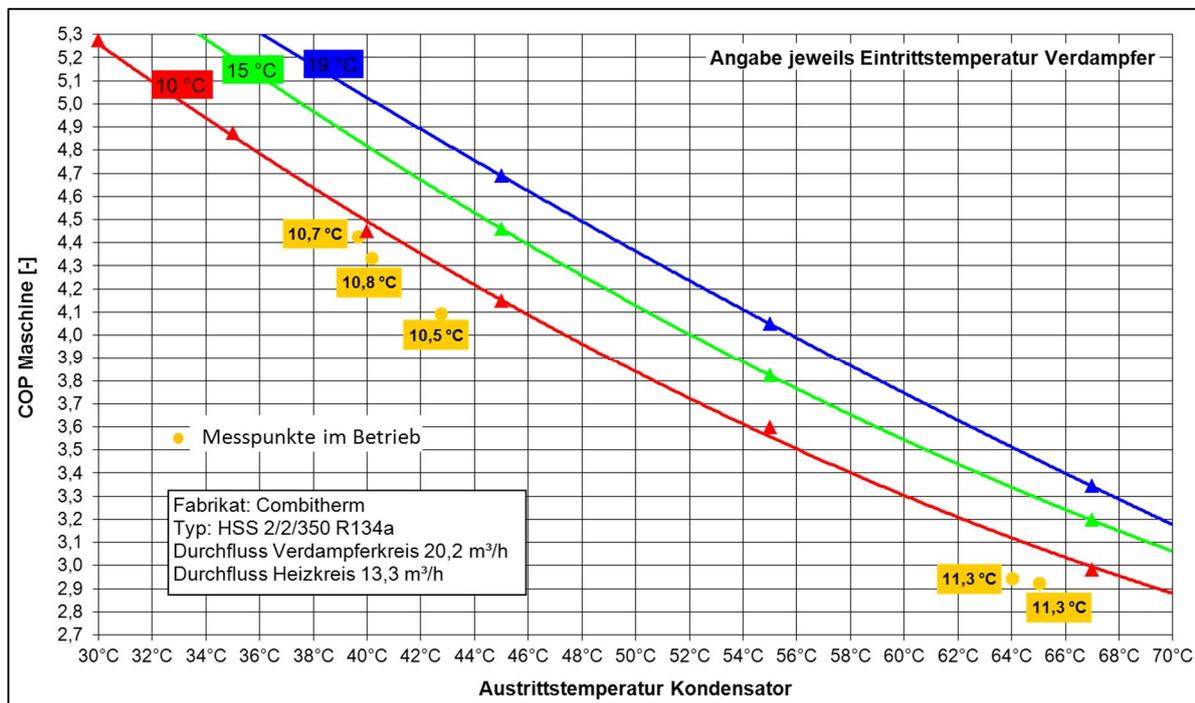


Abbildung 21: Kennfeld der Wärmepumpe (Angaben des Herstellers) mit COP und Messpunkten im Betrieb

Die Abbildung 21 zeigt das Kennfeld für die Wärmepumpe. Im Diagramm ist die Arbeitszahl der Wärmepumpe COP über der Heizungsvorlauftemperatur (Austrittstemperatur Kondensator) für verschiedene Vorlauftemperaturen der Wärmequelle (Verdampfeintrittstemperatur) aufgetragen. Das COP der Maschine ist ein Kennwert und keine Jahresarbeitszahl. Das COP wird mit der Heizleistung bezogen auf die elektrische Stromaufnahme der Verdichter berechnet. Die Stromaufnahme der Umwälzpumpe Wärmequelle wird dabei nicht berücksichtigt. Die Kurven für Quelltemperaturen 10 °C, 15 °C und 19 °C sowie die Punkte jeweils sind Angaben des Herstellers.

Das COP wurde durch Messungen im Betrieb überprüft. Dazu wurden jeweils in einem Betriebspunkt 10 Messpunkte für die Heizleistung und die elektrische Leistung der Verdichter mit dem Wärmemengenzähler und dem Stromzähler aufgenommen und gemittelt. Die orangefarbene Messpunkte in Abbildung 21 sind die Ergebnisse der Messungen im September und Oktober 2010 im Rahmen der Abnahme. Das im Betrieb gemessene COP ist ca. 6 % schlechter, als vom Hersteller angegeben. Die Abweichung liegt gerade so im Bereich der Messgenauigkeit von Wärmemengenzähler plus Stromzähler.

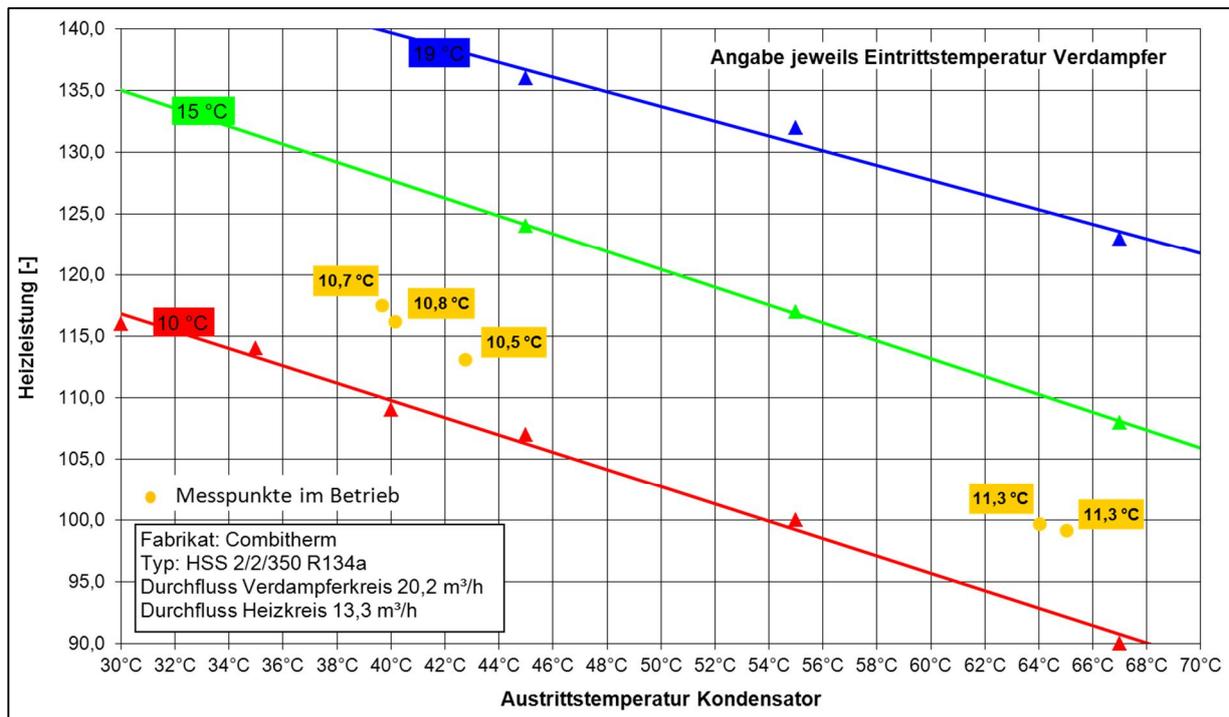


Abbildung 22: Kennfeld der Wärmepumpe (Angaben des Herstellers) mit Heizleistung und Messpunkten im Betrieb

Die Überprüfung der Heizleistung (thermische Leistung Kondensator) der Anlage, siehe Abbildung 22, ergab im Betrieb etwa 3 % höhere Leistungen (orangefarbene Messpunkte) als vom Hersteller angegeben. Die Wärmepumpe wurde auf Basis der Messwerte abgenommen. Die Vorgaben bzgl. Leistung und COP abzgl. der Messtoleranz werden entsprechend Leistungsverzeichnis erfüllt.

Seit Ende Januar 2010 ist die Fernüberwachung aktiv. In dieser Zeit lief die Wärmepumpe fast ohne Störungen. Es mussten lediglich Einstellungen bzgl. Frostschutzabschaltung angepasst bzw. optimiert werden.

Die Abbildung 23 zeigt die aus den Messwerten berechneten Arbeitszahlen für die Wärmepumpe und die gemessene Außentemperatur im Zeitraum Januar 2011 bis Dezember 2012. Der Stromverbrauch der Grundwasserpumpe und der Verdampferkreispumpe wurden bei der Berechnung berücksichtigt. Die gemessene Jahresarbeitszahl ist für das Jahr 2012 angegeben. Die Jahresarbeitszahl beträgt 3,6 und ist besser als der im Energiekonzept prognostizierte Wert mit 3,5. Die monatlichen Arbeitszahlen liegen zwischen 2,7 im Sommerbetrieb und 3,5 im Heizbetrieb. Dies liegt an den unterschiedlichen Sollwerten der Wärmepumpe im Sommerbetrieb von 65 °C und im Heizbetrieb von maximal 40 °C.

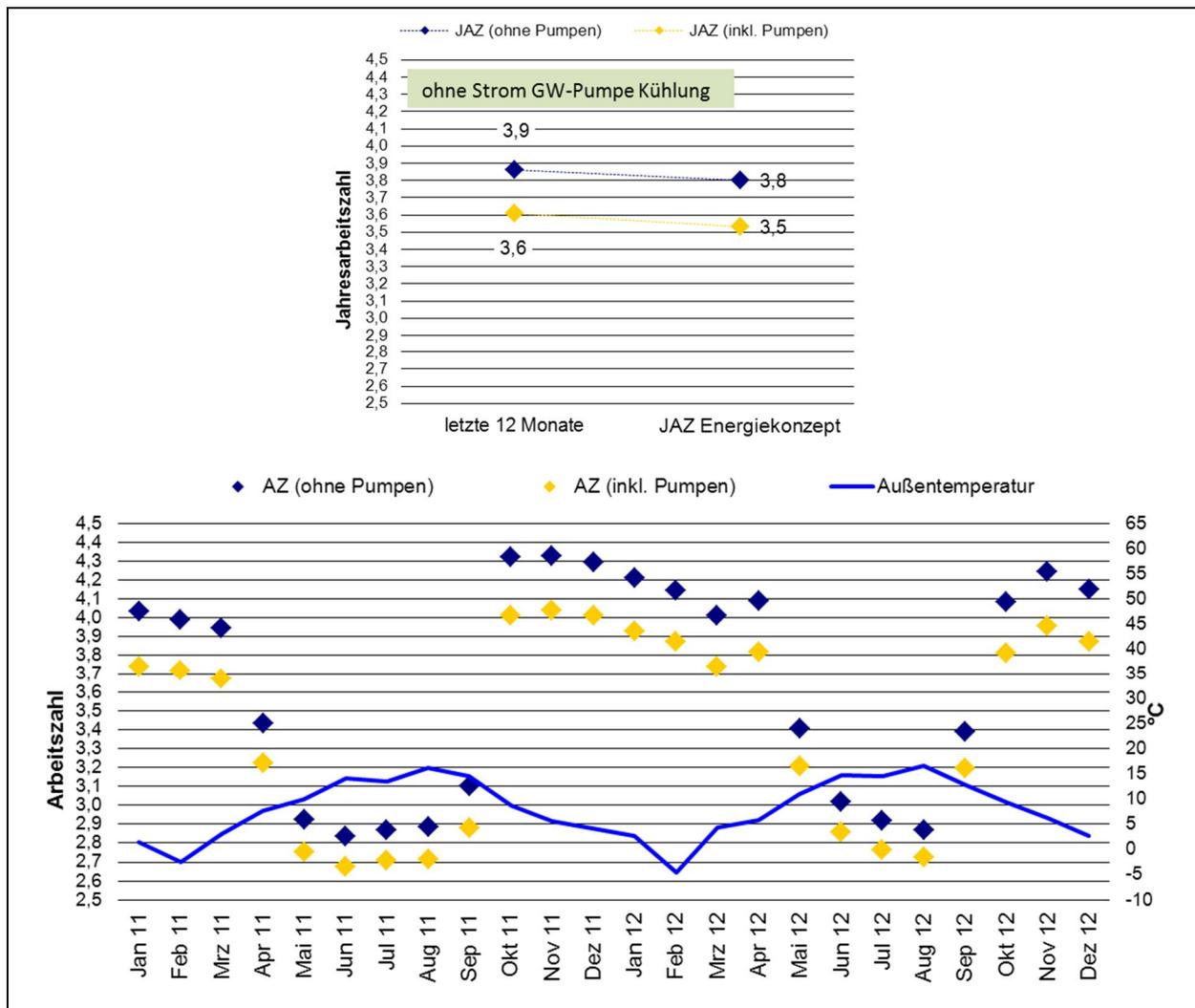


Abbildung 23: Messwerte der Jahresarbeitszahl und der monatlichen Arbeitszahlen der Wärmepumpe und der Abwasser- und Außentemperatur

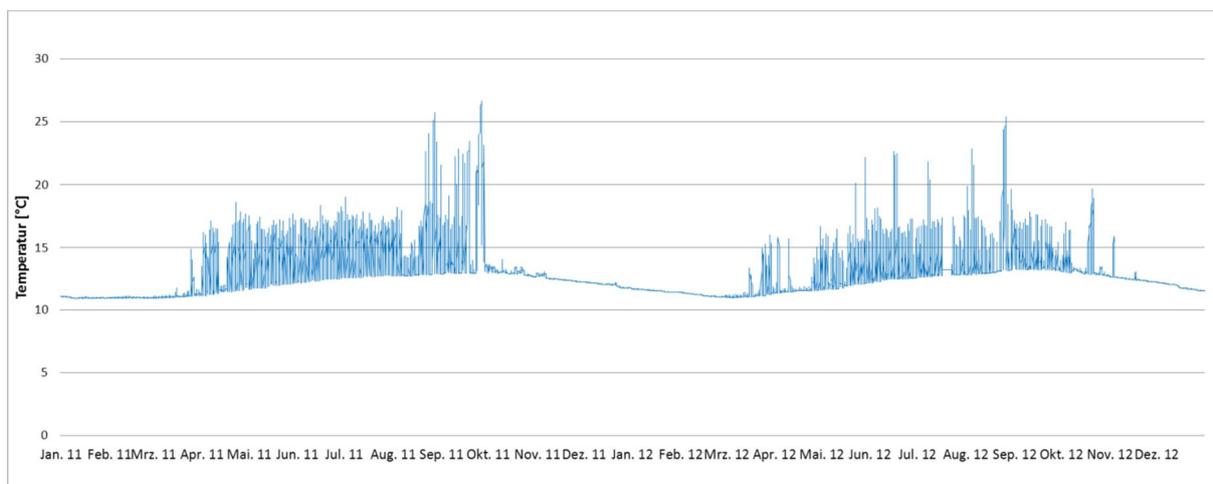


Abbildung 24: Messwerte der Grundwassertemperatur 2011 und 2012 (Eintritt Grundwasser-Wärmetauscher)

Die Grundwassertemperatur ist übers Jahr relativ konstant, siehe Abbildung 24. Die Messwerte liegen zwischen ca. 11 °C im Februar / März und etwas über 13 °C im September. Die Arbeitszahlen im Winter 2011 / 2012 sind besser als im Winter 2010 / 2011. Dies ist auf die Optimierung der Vorlauftemperatur-Regelung der Wärmepumpe zurückzuführen. Die Wärmepumpe hat in der Heizperiode 2010 / 2011 oft zu hohe Temperaturen geliefert, was zur Verschlechterung der Arbeitszahl geführt hat. Durch den Anschluss der Gebäude im zweiten Bauabschnitt stieg der Wärmebedarf in der Heizperiode 2010 / 2011 an und die Wärmepumpe war besser ausgelastet. Dadurch war die Zahl der ungünstigen An- und Abfahrvorgänge mit z.B. Überschwingen der Vorlauftemperatur geringer, was zusätzlich zu einer Verbesserung der Arbeitszahl geführt hat.

7.2 Wasserkraftanlage

Im Energiekonzept war geplant den Strom für den Antrieb der Wärmepumpe bilanziell vollständig mit der WKA zu erzeugen, das heißt die WKA sollte mindestens die Strommenge die zum Antrieb der Wärmepumpe benötigt wird ins Stromnetz einspeisen. Dies wird im Betrieb nicht erreicht, siehe Abbildung 33. Die WKA erzeugt nur etwa 70 % des Antriebsstroms für die Wärmepumpe. Im Vergleich zur geplanten Stromerzeugung laut Energiekonzept ist die im Betrieb produzierte Strommenge ca. 39 % geringer. Die Gründe für die geringere Stromerzeugung sind zum einen auf die etwa 5 bis 10 cm geringere Stauhöhe, aufgrund von Schutt im Kanal und dem damit verbundenen höheren Unterwasserspiegel flussabwärts der WKA zurückzuführen. Zum anderen reduziert der relativ häufige Ausfall der WKA infolge von Störungen die Stromerzeugung. So ist zum Beispiel der Anfall von Treibgut und Unrat im Kanal wesentlich höher als bei der Planung angenommen.

Die Auflagen zur genehmigten Schall-Immission werden bei weitem eingehalten. Trotzdem musste aufgrund von Beschwerden der Bewohner die Drehzahl der Anlage reduziert werden, was die Leistung vermindert. Die im Rahmen der Planung prognostizierte Wassermenge im Kanal stand erstmalig im November 2012 zur Verfügung. Bis dahin war die Wassermenge immer geringer. Grund für die geringere Wassermenge ist die Einstellung eines Wehres oberhalb der WKA im Bereich Abgang Kanal von der Dreisam, auf die der Betreiber badenova keinen Einfluss hat. Die Kosten für den Betrieb der Anlage insbesondere für die Störungsbeseitigung sind relativ hoch. Diese können jedoch durch die bessere Planung des Betriebsablaufes für Reinigung und Bedienung noch reduziert werden.

7.3 Hydraulik Nahwärmeverteilnetz und Wärmeübergabestationen

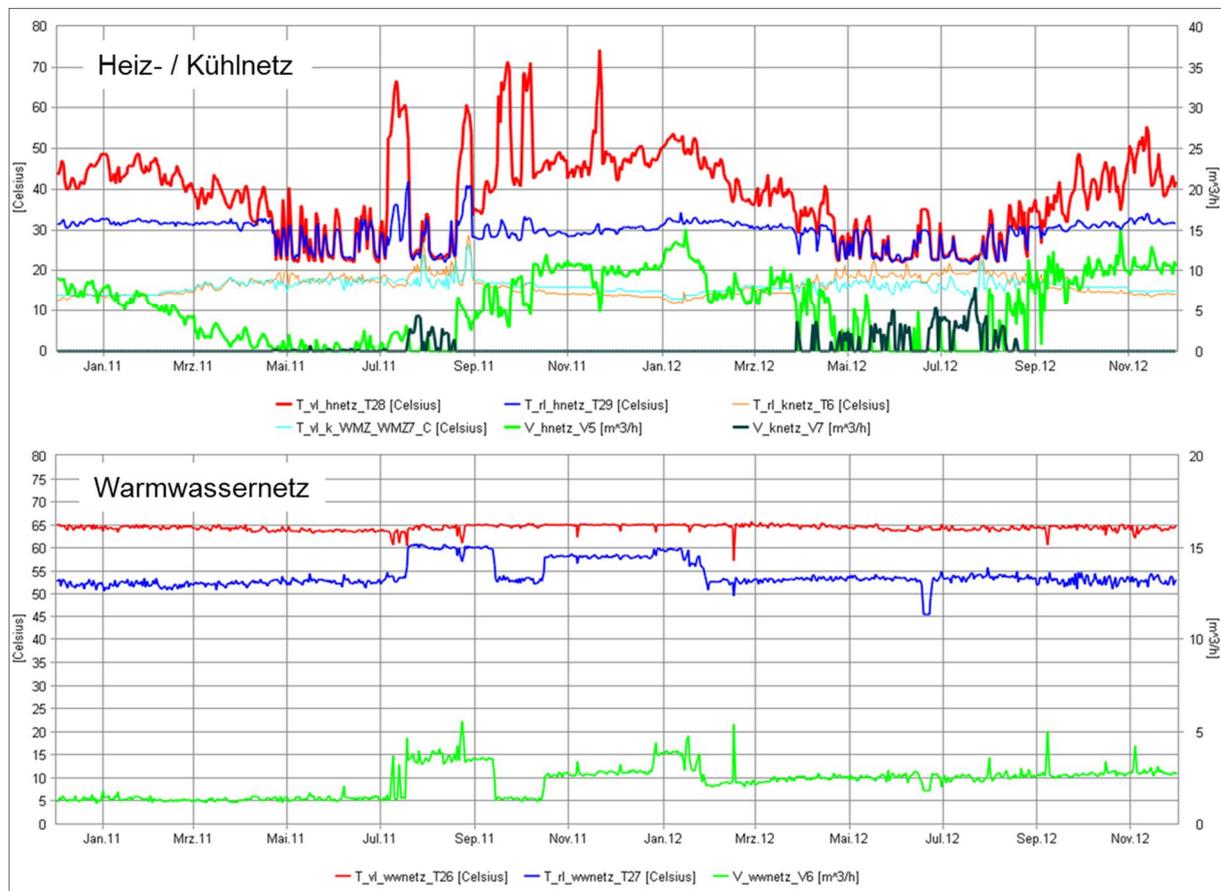


Abbildung 25: Messwerte Vor- und Rücklauftemperaturen und Durchfluss im Heiz- / Kühlnetz und Warmwassernetz

Die Abbildung 25 zeigt die Messwerte von Temperaturen und Durchfluss im Heiz- / Kühlnetz (oben) und im Warmwassernetz. Die Messwerte zeigen, dass die Hydraulik wie geplant funktioniert. Im Heiznetz liegen die Vorlauftemperaturen im Heizbetrieb zwischen 35 °C und 55 °C und die Rücklauftemperaturen bei ca. 30 °C. Dies bedeutet im Heizbetrieb optimale Betriebsbedingungen mit niedrigen Temperaturen für die Wärmepumpe verbunden mit guten Arbeitszahlen. Im Zeitraum Juli bis Dezember 2011 wurde der Estrich in den Gebäuden im zweiten Bauabschnitt aufgeheizt. In diesem Zeitraum waren Vor- und Rücklauftemperaturen im Heiznetz deutlich höher.

Im Sommerbetrieb ist das Heiznetz ausgeschaltet. Das Netz wird bei Anforderung aus den Gebäuden zur Kühlung genutzt. Die Vorlauftemperatur im Kühlbetrieb beträgt ca. 12 °C bis 14 °C, die Rücklauftemperatur ca. 19 °C. Der Rücklauf aus dem Kühlnetz wird der Wärmepumpe als Vorlauf zum Verdampfer zugeführt. Die Temperaturerhöhung im Kühlnetz und die damit verbundene höhere Wärmequellentemperatur verbessert während des Kühlbetriebs die Arbeitszahl der Wärmepumpe. Die Kühlung wurde 2012 von den Bewohnern deutlich mehr genutzt als 2011, dies liegt an der 2012 an die Bewohner verteilten Information über den Kühlbetrieb. Die Vorteile und Optimierung des Kühlbetriebs ist detailliert im Abschnitt 8. Betriebsoptimierung beschrieben.

Das Warmwassernetz, siehe Abbildung 25 (unten) wird ganzjährig mit 65 °C Vorlauftemperatur betrieben. Die Rücklauftemperaturen liegen bei 45 °C bis 55 °C. Im Zeitraum Juli bis September 2011 und November 2011 bis Februar 2012 wurden wesentlich höhere Volumenströme und Rücklauftemperaturen gemessen, dies ist auf Bypässe und den unregelmäßigen Betrieb der Warmwasserbereiter in den neu angeschlossenen Stationen im zweiten Bauabschnitt zurückzuführen. Seit Februar 2012 liegen die Temperaturen und Volumenströme wieder im normalen Bereich. Hier zeigt sich deutlich der Vorteil des Monitorings. Derartige Mängel sind ohne Monitoring nur schwer festzustellen.

Die Aufteilung auf zwei Verteilnetze das Heiz- / Kühlnetz und das Warmwassernetz lässt erst einmal höhere Verteilverluste vermuten. Niedrige Betriebstemperaturen und Abschalten im Sommer reduzieren wiederum die Wärmeverluste im Heiznetz deutlich. Die Aufteilung in zwei Netze ermöglicht zusätzlich den Kühlbetrieb. Abbildung 26 zeigt die gemessenen Verluste in der Heizzentrale und in den beiden Netzen. Auf die Wärmeeinspeisung der Wärmeerzeuger bezogen geht in der Heizzentrale ca. 2 % der Wärme verloren, dies sind hauptsächlich die Verluste der Pufferspeicher. Im Netz kommen noch etwa 9 % Verluste dazu. Das heißt die Gesamtverluste bezogen auf die Einspeisung der Wärmeerzeuger betragen nur 11%! Dies ist für eine Nahwärmeversorgung mit Betrieb von zwei Wärmeverteilnetzen ein relativ geringer Wert. Bei der Messung der Verluste ist zu beachten, dass der Einfluss der Messfehler der Wärmemengenzähler auf den Wert der Verluste sehr groß ist. Die Verluste werden aus der Wärmebilanz als Differenz Erzeugung – Verbrauch berechnet. Unterstellt man einen maximalen Fehler der Zähler von z.B. 3 % jeweils in die ungünstige Richtung, dann bedeutet dies um Faktor 1,5 höhere Verluste!

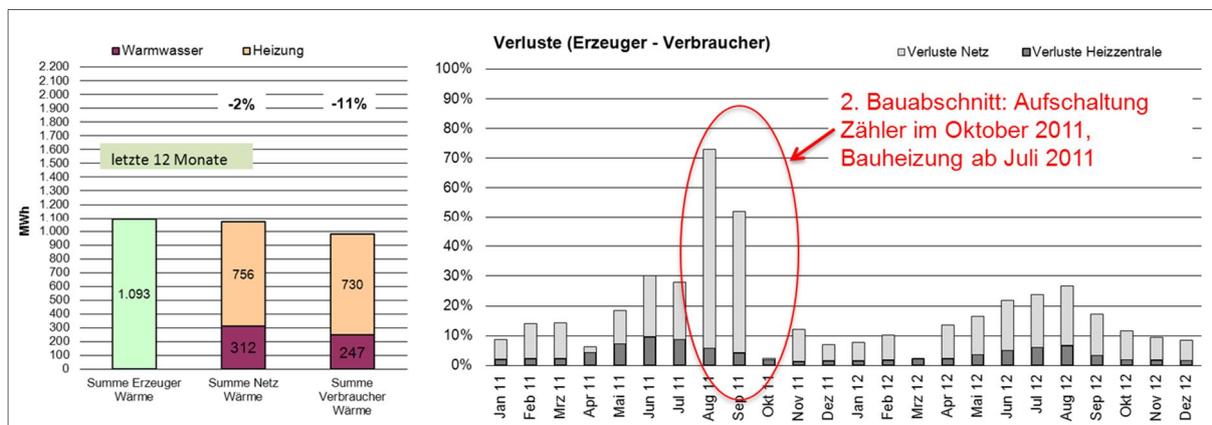


Abbildung 26: Messwerte der Verluste in der Heizzentrale und in den Wärmeverteilnetzen Heiz- / Kühlnetz und Warmwassernetz, Bezug: Eingespeiste Wärmemenge Erzeuger

Im Winter betragen die anteiligen Verluste weniger als 10 %. Im Sommer steigen die Verluste auf maximal 27 %. Die Verluste im Sommer 2011 waren bedingt durch den noch nicht angeschlossenen zweiten Bauabschnitt deutlich höher als im Sommer 2012.

Die Gebäude im Zweiten Bauabschnitt wurden ab Juli 2011 mit Wärme für Bauheizung (Estrichtrocknung) versorgt. Die Wärmemengenzähler in den Stationen dieser Gebäude wurden jedoch erst im Oktober 2012 an die Messdatenerfassung angeschlossen. Zur Bilanzierung wurden im Zeitraum Oktober 2011 bis September 2012 die Werte durch Ablesung der Stichtagswerte am Zähler erfasst und in die Messdatenerfassung übernommen. In den Monaten Juli bis September 2011 liegen keine Werte vor, aus diesem Grund sind die Messwerte der Verluste in der Abbildung 26 für diese Monate falsch.

7.4 Wärmebilanz

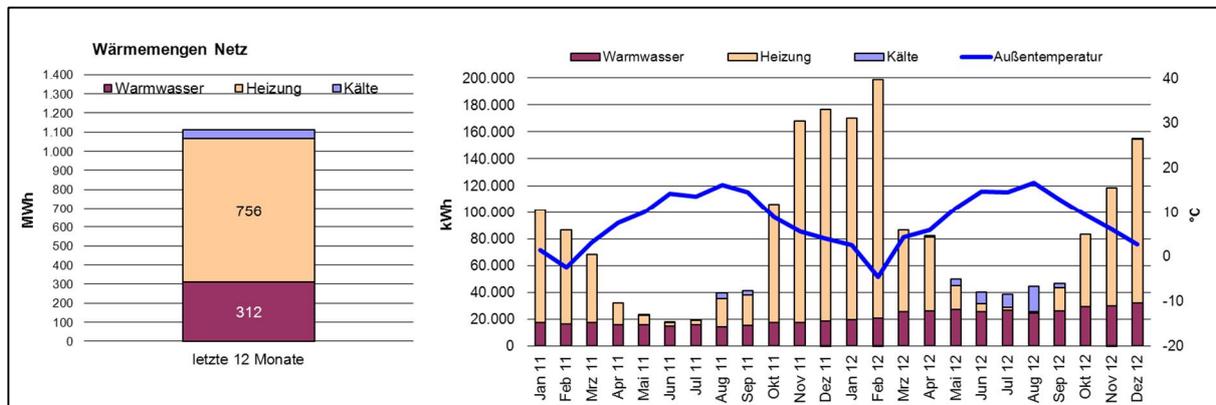


Abbildung 27: Anteile der in die Netze eingespeiste Wärme- / Kältemenge

Die Abbildung 27 zeigt die gemessenen Anteile am Wärme- / Kältebedarf für Heizung, Warmwasserbereitung und Kühlung mit Basis jeweils in ins Netz eingespeiste Wärme- / Kältemenge. Der gemessene Wärmebedarf ist ca. 5 % höher als im Energiekonzept berechnet. Zukünftig wird der Wärmebedarf noch etwas höher sein, da die Gebäude im zweiten Bauabschnitt zwar schon beheizt wurden, aber die Wohnungen erst bis Ende März 2012 vollständig bezogen waren.

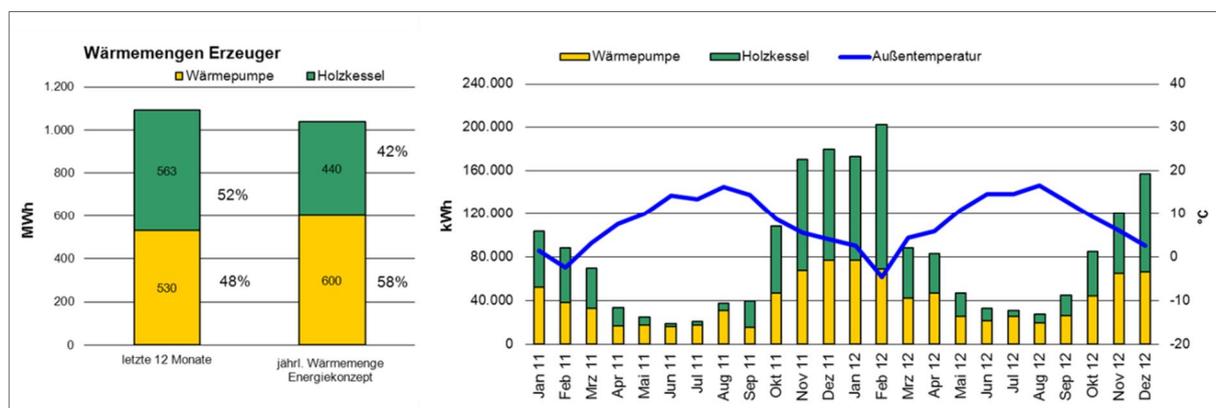


Abbildung 28: Anteile der Wärmeerzeuger an der Wärmeversorgung

Die Abbildung 28 zeigt die gemessenen Deckungsanteile der Wärmeerzeuger an der Wärmeversorgung seit Januar 2011 und im Betriebsjahr 2012. Die Wärmelieferung der Wärmepumpe ist ca. 12 % geringer als im Energiekonzept. Der Deckungsanteil der Wärmepumpe 2012 ist bedingt durch die geringere Wärmelieferung der Wärmepumpe und den etwas höheren Wärmebedarf im Vergleich zum Energiekonzept geringer. Der Holzessel hat einen Anteil von etwa 52 %.

Grund für die geringere Wärmelieferung der Wärmepumpe ist die Anhebung der Netzvorlauftemperatur im Heiznetz abhängig von der Außentemperatur um 5 K bis 7 K. Die Netzvorlauftemperatur musste erhöht werden, da aufgrund von Mängeln in der Heizanlage im Gebäude mit Gewerbenutzung die Räume nicht ausreichend warm wurden.

7.5 Kühlung

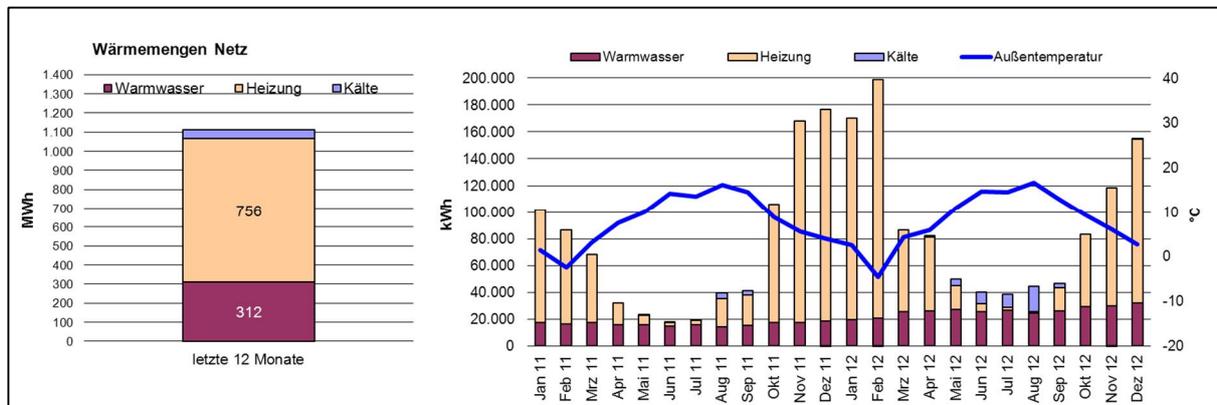


Abbildung 29: Anteile der in die Netze eingespeiste Wärme- / Kältemenge

Im Sommerbetrieb wird der Kühlbetrieb abhängig von der Außentemperatur aktiviert. In der Heizzentrale werden die Grundwasserpumpe und die Kühlnetzpumpe und in den Hausstationen die Heiz-(Kühl-)kreispumpe in Betrieb genommen. Die Vorlauftemperatur im Heiz-(Kühl-)kreis wird auf 18 °C eingeregelt. Zusätzlich wird vom Stationsregler in den Gebäuden ein Signal an die Raumthermostate „Kühlbetrieb ein“ ausgegeben. Durch Einstellung einer bestimmten Raumtemperatur an den Thermostaten wird die Kühlung in den jeweiligen Räumen in Betrieb genommen. Wird im Gebäude keine Kälte abgenommen, so wird die Kühlung in diesem Gebäude für einen einstellbaren Zeitraum ausgeschaltet. Zur Leistungsbegrenzung kann die Kühlung im Intervallbetrieb betrieben werden, das heißt es werden im Wechsel nur jeweils vier Gebäude gleichzeitig gekühlt. Das Gebäude mit Gewerbenutzung und das Augustinusheim haben keine Kühlfunktion über die zentrale Versorgung. Das Gebäude mit Gewerbenutzung hat eine eigene Kälteversorgung.

Die Raumkühlung wurde im ersten Betriebsjahr 2011 von den Bewohnern wenig bis überhaupt nicht genutzt. Die Information der Bewohner durch Verteilung einer detaillierten Funktionsbeschreibung hat dazu geführt, dass die Kühlung im Sommer 2012 verstärkt genutzt und von den Bewohnern genossen wurde.

Zur Überprüfung der Funktion des Kühlbetriebs und Ermittlung der Auswirkung der Raumkühlung war geplant im August 2012 in einem Gebäude die Kühlung für jeweils einen definierten Zeitraum von zwei Wochen ein- bzw. auszuschalten. In diesem Gebäude sind in mehreren Wohnungen in ein bis zwei Räumen Raumtemperaturfühler und Raumfeuchtefühler installiert, die auf die Messdatenerfassung aufgeschaltet sind. Die Bewohner dieser Wohnungen wurden vorab in einem Schreiben gebeten, die Kühlung in den vorgenannten Zeiträumen zu aktivieren bzw. zu deaktivieren. Mangels Rückmeldung von den Bewohnern konnte mit Ausnahme einer Wohnung nicht exakt festgestellt werden, ob die Kühlung im vorgegebenen Zeitraum in den Räumen ausgeschaltet war. Die zentrale Deaktivierung der Kühlung war aufgrund von Beschwerden von Bewohnern ebenfalls nicht möglich. Aus diesem Grund stehen nur die Ergebnisse der Messungen aus einer Wohnung zur Verfügung.

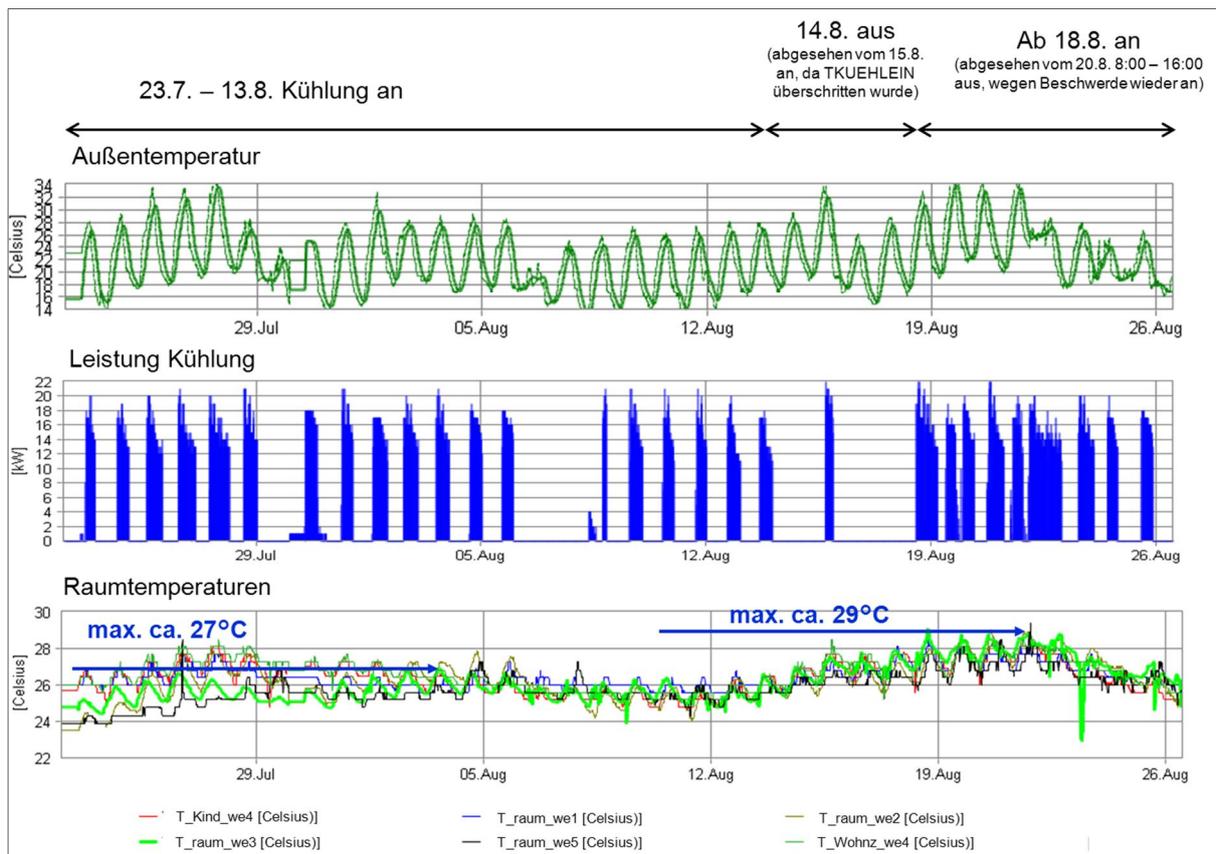


Abbildung 30: Überprüfung Kühlbetrieb im Sommer 2012, Messwerte der Außentemperatur, Kühlleistung und der Raumtemperaturen

Die Abbildung 30 zeigt die Messwerte der Außentemperatur, der Kühlleistung und der Raumtemperaturen in den vorgegebenen Zeiträumen. Es sind die Messwerte aus dem Gebäude mit installierter Messtechnik in den Wohnungen dargestellt. Sowohl im Zeitraum mit Vorgabe „Kühlung ein“ (23.07. bis 12.08.2012) als auch im Zeitraum „Kühlung aus“ (13. bis 26.08.2012) sind Tage mit Außentemperaturen größer 30 °C vorhanden. Insgesamt steigen die Raumtemperaturen bei eingeschalteter Kühlung nicht über 28 °C. In der Wohnung we3 (dicke hellgrüne Linie) mit Rückmeldung „Kühlung aus“ liegt im Zeitraum ohne Kühlung die gemessene Raumtemperatur ca. 2 °C höher als mit Kühlbetrieb. Bei allen anderen Wohnungen sind keine Unterschiede festzustellen. Auch im Zeitraum mit Vorgabe „Kühlung aus“ wurde im Gebäude gekühlt, siehe Werte Leistung Kühlung.

Die Spreizung im Fussbodenheizkreis (Vorlauf 18 °C, Rücklauf 20 °C) beträgt im Kühlbetrieb ca. 2 K. Im Heizbetrieb beträgt die Spreizung im Auslegungspunkt ca. 10 K (Vorlauf 40 °C, Rücklauf 30 °C). Dies bedeutet im Kühlbetrieb werden maximal 20 % der Heizleistung, das heißt knapp 10 W pro m² Wohnfläche an den Raum abgegeben.

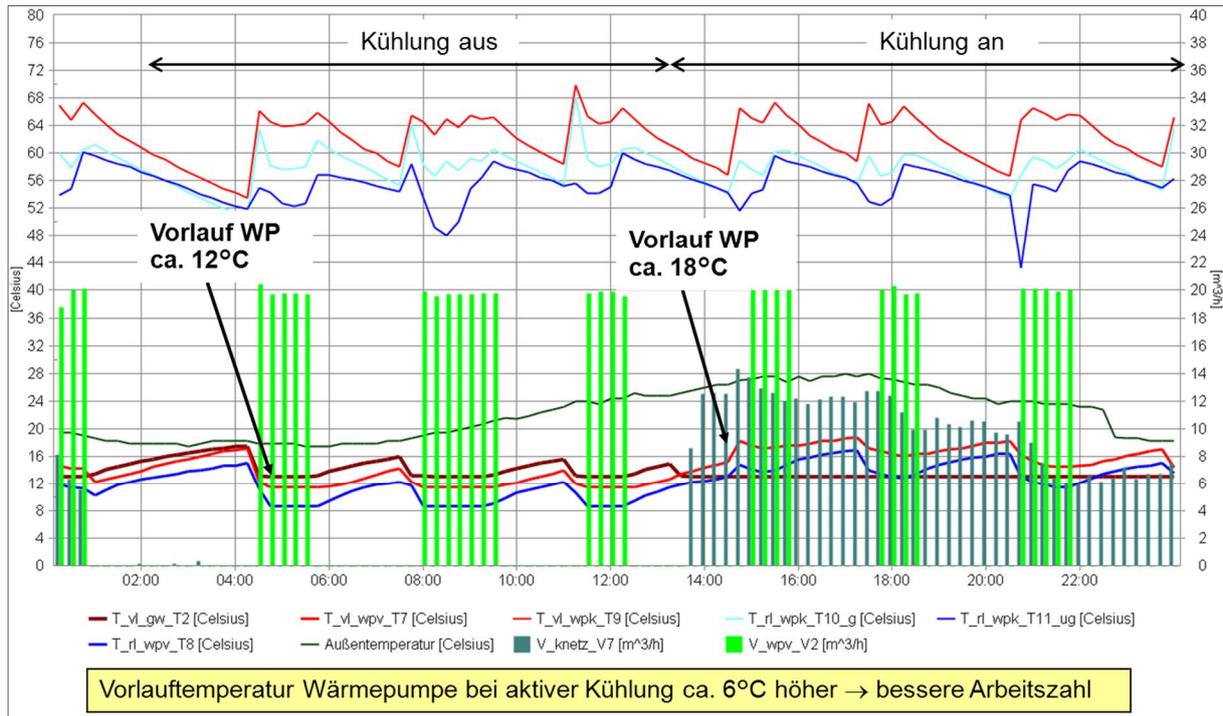


Abbildung 31: Gleichzeitiger Betrieb von Kühlung und Wärmepumpe

Der Parallelbetrieb von Kühlung und Wärmepumpe ist günstig für die Wärmepumpe. Durch den Kühlbetrieb wird die Eintrittstemperatur in den Verdampfer der Wärmepumpe angehoben und damit die Arbeitszahl der Wärmepumpe verbessert, siehe Abbildung 31. Ohne Kühlung beträgt die Verdampfer Eintrittstemperatur ca. 12 °C, mit Kühlung 18 °C.

7.6 CO₂ - Emissionen

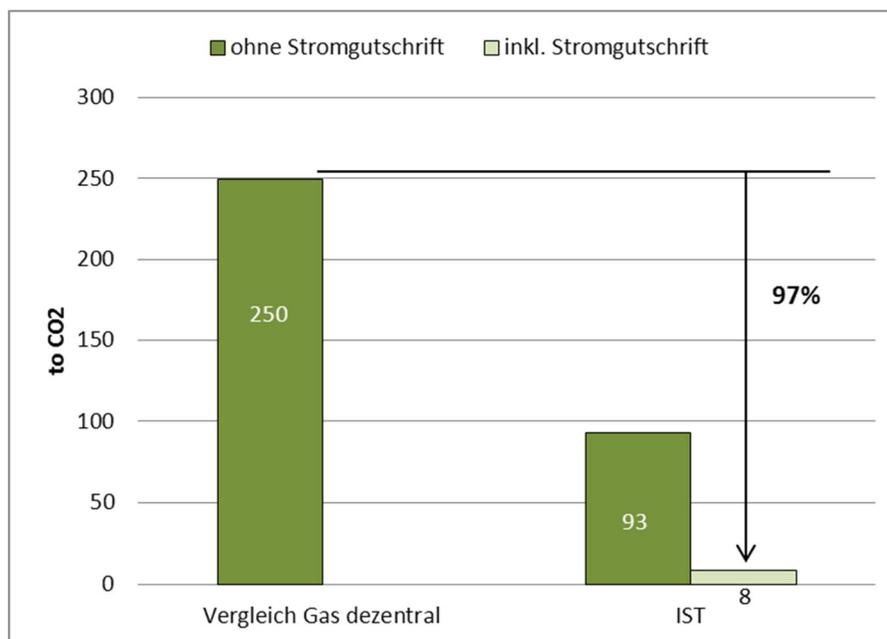


Abbildung 32: CO₂ – Emissionen für das Betriebsjahr 2012 aus den Messungen

Im Energiekonzept wurde die Reduzierung der CO₂ - Emissionen im Vergleich zu Gaseinzelheizungen mit 91 % berechnet, siehe Abbildung 2. Trotz der geringeren Stromerzeugung der Wasserkraftanlage, siehe Abbildung 33, ergibt sich aus den Messungen mit den aktuell gültigen Faktoren für die spezifischen CO₂-Emissionen nach Gemis 4.7 2011 (Kennzahl für Stromverdrängungsmix berücksichtigt) eine höhere Reduzierung von ca. 97 %. Grund dafür ist der hohe Faktor für die Einspeisung regenerativen Stroms aus der Wasserkraftanlage ins Netz. Die Wasserkraftanlage produziert nur etwa 70 % der Strommenge, die für den Antrieb der Wärmepumpe benötigt wird. Die Gründe dafür sind im Abschnitt 7.2 beschrieben. Im Energiekonzept war vorgesehen, dass die Wasserkraftanlage etwa die gleiche Strommenge erzeugt, die zum Antrieb der Wärmepumpe inkl. der Grundwasserpumpe und der Pumpe im Verdampferkreis benötigt.

Erfreulich ist, dass die Wärmepumpe inkl. Umwälzpumpen weniger Strom verbraucht als im Energiekonzept berechnet. Dies ist zum größten Teil auf die geringere Wärmelieferung der Wärmepumpe und zusätzlich auf bessere Arbeitszahlen der Wärmepumpe zurückzuführen.

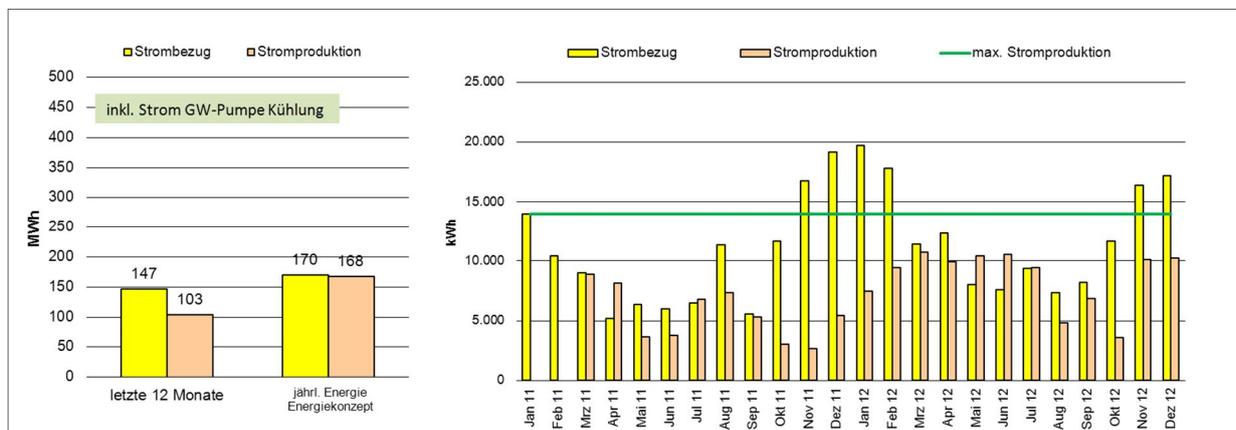


Abbildung 33: Messwerte Stromverbrauch der Wärmepumpe und Stromproduktion der Wasserkraftanlage

8 Betriebsoptimierung

Wie in Abschnitt 7.4 beschrieben, ist der Anteil der Wärmepumpe an der Wärmeerzeugung geringer, als im Energiekonzept. Grund dafür sind, wie bereits beschrieben, die höheren Betriebstemperaturen im Heiznetz aufgrund von Mängeln in den gebäudeeigenen Heizanlagen.

Die Abbildung 34 zeigt die Auslastung der Wärmeerzeuger. Die Auslastung der Wärmepumpe lag im Januar und Februar 2011 bei nur ca. 60 %. In den Monaten November 2011 bis Februar 2012 war die Wärmepumpe fast durchgängig zu 100 % ausgelastet, im November und Dezember 2012 zu etwa 90 %. Die höhere Auslastung der Wärmepumpe ist zum einen auf den höheren Wärmebedarf durch den Anschluss des zweiten Bauabschnitts zurückzuführen. Zusätzlich wurde die Vorlauftemperaturregelung der Wärmepumpe optimiert.

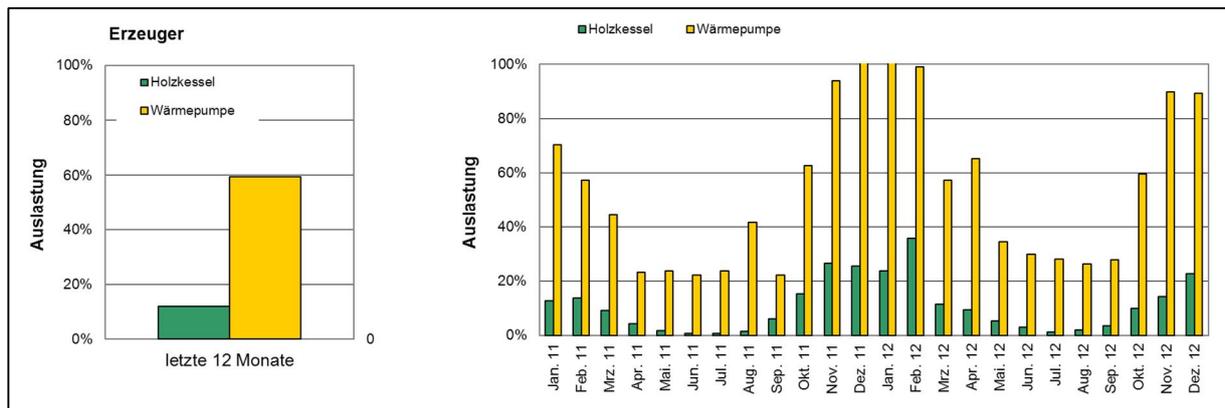


Abbildung 34: Auslastung der Wärmeerzeuger

Betrachtet man die Ergebnisse 2012, so kann der Anteil in den Monaten November und Dezember jeweils etwa um 10 % gesteigert werden. Zusätzliche geringe Steigerungen sind in den Übergangszeiten mit Heizbetrieb möglich. In den Sommermonaten sollte der Wärmebedarf zu 100 % durch die Wärmepumpe gedeckt werden. Ziel ist es, den Holzessel im Sommer auszuschalten, um Beeinträchtigungen vor Ort durch Emissionen zu verhindern. Die Messungen zeigen, dass der Holzessel einen nicht unerheblichen Teil in den Sommermonaten gedeckt hat, siehe Abbildung 28. Dies ist im Wesentlichen auf die außentemperaturabhängige Umschaltung zwischen Heiz- und Sommerbetrieb zurück zu führen. Hier wird empfohlen entweder den Sollwert für die Umschaltung Heizbetrieb / Sommerbetrieb abzusenken oder in den Sommermonaten z.B. Juni bis August von Hand auf Sommerbetrieb umzuschalten. Probleme mit zu geringer Vorlauftemperatur im Warmwassernetz aufgrund zu geringer Leistung der Wärmepumpe im Sommerbetrieb sind nicht bekannt.

Der Anteil der Wärmepumpe kann zusätzlich gesteigert werden, indem der maximale Sollwert für die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe erhöht wird. Mit der Erhöhung der Vorlauftemperatur sinkt die Arbeitszahl der Wärmepumpe, das heißt pro kWh erzeugte Wärme muss mehr Strom für den Antrieb der Wärmepumpe eingesetzt werden. Ist die Vorlauftemperatur z.B. 5 K höher, sinkt die Arbeitszahl um ca. 0,2 bis 0,3. Die Vorlauftemperatur sollte daher nur geringfügig erhöht werden, damit die Arbeitszahl nicht zu schlecht wird.

Es wird empfohlen zur Kompensation der Temperaturerhöhung im Heiznetz den Maximalwert für die Sollvorlauftemperatur der Wärmepumpe um 4 - 5 K zu erhöhen. Mit dieser Einstellung kann die Wärmelieferung der Wärmepumpe auf den Wert im Energiekonzept von etwa 600 MWh/a und der Anteil der Wärmepumpe auf ca. 55 % gesteigert werden. Gleichzeitig sinkt die Jahresarbeitszahl auf etwa 3,5 entsprechend Energiekonzept.

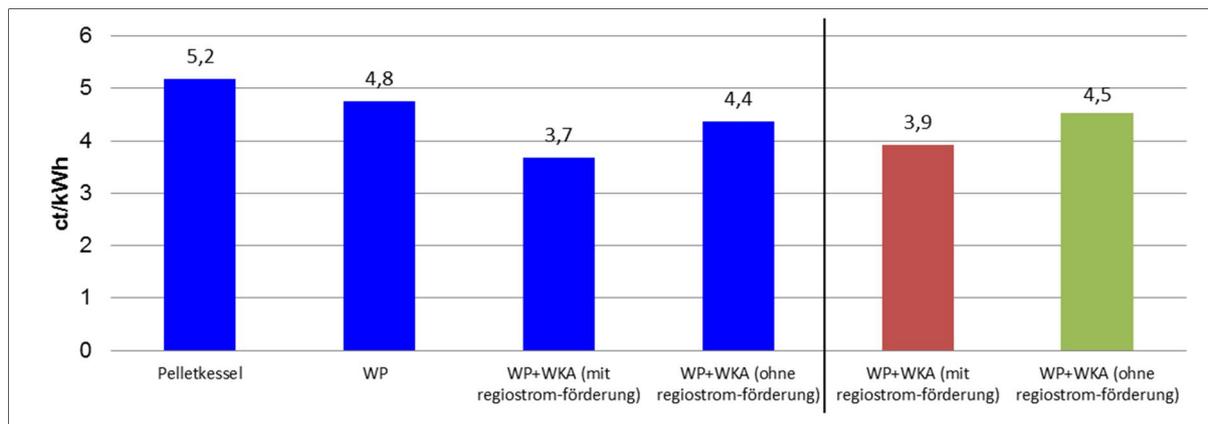


Abbildung 35: Wärmeerzeugungskosten (Energie + Wartung) der unterschiedlichen Wärmeerzeuger, keine Gesamtkosten, Kostenansatz ohne Betriebsführung, ohne Abrechnung, ohne Wartung und Instandsetzung der restlichen Anlagenteile, ohne Gemeinkosten

Die Abbildung 35 zeigt die Kosten für die Wärmeerzeugung mit der Kombination *Wärmepumpe + Wasserkraftanlage*, mit dem *Holzessel* und mit der *Wärmepumpe* ohne Wasserkraftanlage jeweils mit den aus den Messungen bestimmten Wirkungsgraden. Diese sind:

- Arbeitszahl Wärmepumpe 3,6
- Wirkungsgrad Holzessel 85 %

Die Kosten enthalten die Energie- und die Wartungskosten. Kapitalkosten sind nicht berücksichtigt. Als Energiekosten wurden die aktuellen Bezugskosten des Betreibers badenova eingesetzt. Bei der Kombination *Wärmepumpe + Wasserkraftanlage* speist die Wasserkraftanlage in das öffentliche Stromnetz ein und die Wärmepumpe entnimmt den Strom für den Antrieb (inkl. Umwälzpumpen) aus dem Netz. Für die Kombination *Wärmepumpe + Wasserkraftanlage* sind die Kosten mit und ohne Regiostrom-Förderung, die 2012 ausgelaufen ist, angegeben. In beiden Fällen ist die Wärmeerzeugung mit den geringsten Kosten die Kombination *Wärmepumpe + Wasserkraftanlage* gefolgt vom *Holzessel* und Einzelbetrieb *Wärmepumpe*.

Die bisher eingestellte Betriebsweise der Wärmepumpe in der Grundlast und Deckung der Mittellast und der Spitzenlast mit dem Holzessel hat sich als die günstigste Lösung erwiesen. Die Deckung der Grundlast mit der Wärmepumpe in Kombination mit der Wasserkraftanlage ist aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen sinnvoll. Die Wärmeerzeugungskosten und die CO₂-Emissionen sind minimal.

Wie bereits beschrieben kann der Anteil der Wärmepumpe an der Wärmeerzeugung durch Anhebung der Solltemperaturen der Wärmepumpe erhöht werden. Mit der Erhöhung der Solltemperaturen sinkt die Arbeitszahl der Wärmepumpe, das heißt die Wärmepumpe verbraucht je erzeugte kWh Wärme mehr Strom. In der Abbildung 35 rechts sind die Wärmeerzeugungskosten für die Kombination *Wärmepumpe + Wasserkraftanlage* im Betrieb mit Erhöhung des Maximalwerts für die Sollvorlauftemperatur der Wärmepumpe um 5 K, siehe oben, jeweils mit und ohne Regiostrom-Förderung angegeben. Die Erzeugungskosten steigen leicht um ca. 5 % bzw. 2 % an, liegen aber deutlich unter den Erzeugungskosten mit dem Holzpelletskessel.

Für den Betrieb mit angehobenem Sollwert der Wärmepumpe um ca. 5 K wurden die Anteile Wärmepumpe und Holzessel mit ca. 55 % und ca. 45 % abgeschätzt (Basis Wärmebedarf

2012, störungsfreier Betrieb der Wärmepumpe und 100 % Deckung durch die Wärmepumpe in den Sommermonaten vorausgesetzt). Die Arbeitszahl der Wärmepumpe beträgt 3,5.

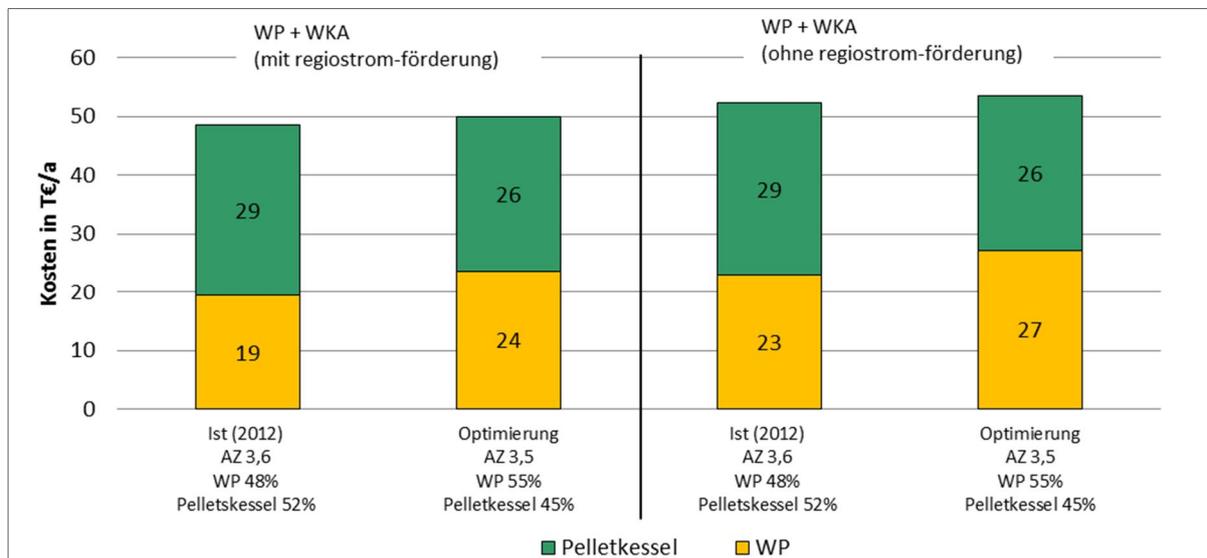


Abbildung 36: Jährliche Wärmeerzeugungskosten (Energie und Wartung) Ist-Zustand und Optimierung, keine Gesamtkosten, Kostenansatz ohne Betriebsführung, ohne Abrechnung, ohne Wartung und Instandsetzung der restlichen Anlagenteile, ohne Gemeinkosten

Die Abbildung 36 zeigt den Vergleich der jährlichen Wärmeerzeugungskosten (Wartung und Energie) für die Betriebsergebnisse 2012 („Ist“) und den Betrieb mit angehobenem Sollwert („Optimierung“) jeweils mit und ohne Regiostrom-Förderung. Basis ist wieder der gemessene Bedarf 2012. Die jährlichen Erzeugungskosten steigen geringfügig um etwa 2,5 %. Voraussetzung ist ein störungsfreier Betrieb der Wärmepumpe. Die Reduzierung der CO₂-Emissionen im Vergleich zu Gaseinzelheizungen sinkt gleichzeitig von 97 % auf ca. 91 % und liegt damit bei dem im Energiekonzept genannten Wert. Basis sind wieder die aktuell gültigen Kennwerte für die spezifischen CO₂-Emissionen nach Gemis 4.7 2011 (Kennzahl für Stromverdrängungsmix berücksichtigt). Fazit: Die Erhöhung des Anteils der Wärmepumpe auf die im Energiekonzept genannten Werte verschlechtert jeweils geringfügig die Wirtschaftlichkeit und die Ökologie.

9 Zusammenfassung und Empfehlungen

Die Realisierung der Anlage zur Wärmeversorgung im Projekt „Wohnen am Schlossberg“ ist abgeschlossen. Mit Ausnahme der Wasserkraftanlage lief die Anlage in den ersten Betriebsjahren nahezu störungsfrei.

Die Absenkung der Systemtemperaturen durch die Optimierung der Wärmeverteilung ist die Voraussetzung für die Einbindung von Wärmepumpen in Nahwärmeversorgungen. Die Hydraulik der Anlage muss sehr sorgfältig geplant werden. Insbesondere die Einbindung der Warmwasserbereitung, die in Mehrfamilienhäusern oft zu hohen Rücklauftemperaturen führt, ist von großer Bedeutung. In den Gebäuden sollten nach Möglichkeit Flächenheizungen mit niedrigen Betriebstemperaturen eingebaut werden. Die Aufteilung auf zwei Verteilnetze jeweils für Heizung und Warmwasserbereitung ist für die Integration einer Wärmepumpe sinnvoll. Die Wärmepumpe kann in der Heizperiode mit optimal niedrigen Systemtemperaturen betrieben werden. Zusätzlich kann das Heiznetz im Sommer zur Kühlung verwendet werden.

Die zentrale Mess-, Steuer- und Regeltechnik ist ein wichtiger Bestandteil zur Optimierung der Anlage. Das Zusammenspiel der Wärmeerzeuger kann nur mit einer zentralen MSR-Technik optimiert werden. Die Aufschaltung der Hausstationen über einen Datenbus ermöglicht die Optimierung des Gesamtsystems bis zur Einspeisung der Wärme in die Gebäude. Mit dieser Technik können Fehler in der Anlage schnell und ohne großen Aufwand erkannt und beseitigt werden. Das Potential zur Absenkung der Rücklauftemperaturen kann so maximal ausgeschöpft werden.

Die maximale Reduzierung der CO₂-Emissionen durch die Integration einer elektrischen Wärmepumpe in die Nahwärmeversorgung liegt unter optimalen Betriebsbedingungen bei 15 bis 20 %. Durch die Kombination elektrische Wärmepumpe mit einer regenerativen Stromerzeugung, zum Beispiel mit einer Wasserkraftanlage und mit einem Holzpelletskessel ist eine Reduzierung von über 90 % erreichbar. Ohne Wasserkraftanlage, nur mit Wärmepumpe und Holzpelletskessel werden die CO₂-Emissionen um etwa 63 % reduziert.

Die Überprüfung der Leistungsfähigkeit der Wärmepumpe ist zu empfehlen. Dazu ist im Leistungsbescrieb ein Kennfeld einzufordern. Einzelne Betriebspunkte sind nicht ausreichend, da diese im Betrieb nicht exakt überprüft werden können. Die Überprüfung ergab, dass die Wärmepumpe die geplante Leistung laut Ausschreibung erreicht.

Die Wasserkraftanlage liefert etwa 39 % weniger Strom als geplant. Die Gründe dafür sind häufige Störungen aufgrund von Treibgut im Kanal und die etwa 5 bis 10 cm geringere Stauhöhe im realen Betrieb. Aufgrund von Schallproblemen kann die Anlage aktuell nicht mit voller Drehzahl betrieben werden.

Die Grundwasserversorgung mit Brunnen, Wärmetauscher und Rigole funktioniert seit der Inbetriebnahme störungsfrei. Der Wärmetauscher erreicht im Betrieb die Leistung laut Ausschreibung.

Die Hydraulik der Wärmeverteilung (Netz Warmwasserbereitung und Heiz-/Kühlnetz) funktioniert sehr gut. Im Betrieb werden im Heiznetz niedrige Systemtemperaturen, insbesondere niedrige Rücklauftemperaturen erreicht. Die Folge sind neben einer guten Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpe mit 3,6 niedrige Verluste in der Anlage von nur 11 % und eine hohe CO₂-Reduzierung von 97 % im Vergleich zu dezentralen Einzelheizungen.

Der Sommerbetrieb nur mit Wärmepumpe lief bisher störungsfrei. Die Leistung der Wärmepumpe mit ca. 100 kW in Kombination mit den Pufferspeichern reicht aus, um die Warmwasserbereiter der Häuser zu versorgen. Vorteil dieser Betriebsweise ist, dass der Holzkessel ausgeschaltet bleiben kann und die Versorgung emissionsfrei erfolgt.

Die sommerliche Kühlung wurde im ersten Betriebsjahr wenig bis überhaupt nicht genutzt. Nach detaillierter Information der Bewohner wurde die Kühlung 2012 häufiger genutzt. Der Effekt der Kühlung ist etwas geringer als erwartet. Die Raumtemperaturen können durch den Kühlbetrieb um etwa 2 K gesenkt werden. Die Temperaturen in den Wohnräumen steigen mit Kühlbetrieb nicht über 28 °C.

Der gemessene Anteil der Wärmepumpe an der Deckung des Wärmebedarfs ist etwas geringer als im Energiekonzept. Grund dafür ist die höhere Vorlauftemperatur im Heiznetz aufgrund von Defiziten in der Heizanlage eines Gebäudes. Es wird empfohlen zukünftig den Sollwert der Wärmepumpe um etwa 5 K anzuheben um den Deckungsanteil der Wärmepumpe auf den geplanten Wert zu erhöhen.

Die Wärmeversorgung mit elektrischer Wärmepumpe, Grundwasser als Wärmequelle, Holzpelletskessel ist ein gutes Konzept für innerstädtische Quartiere mit hohem Einsparpotential bzgl. CO₂-Emissionen und Primärenergieeinsatz. Die Wärmepumpe reduziert die Beeinträchtigungen durch die Emissionen aus der Holzfeuerung insbesondere im Sommer deutlich. Durch die zusätzliche Nutzung der vor Ort verfügbaren Wasserkraft zur Stromerzeugung erfolgt die Versorgung fast zu 100 % regenerativ.

10 Veröffentlichungen

Die Anlage, damals im Bau, wurde im Rahmen der Veranstaltungen / Veröffentlichungen

- „Symposium Große Wärmepumpen“ am 04.02.2010 in Stuttgart
- Auftaktkonferenz in Berlin am 20.05.2010 im Rahmen des Projektes „ImmoKlima“ im ExWost Forschungsprogramm
- „Immoklima“ Schriftenreihe Werkstatt: Praxis Heft 79
- 3. Fachtagung „Regenerative Nahwärme“ in Wiesbaden am 10.07.2010
- 2011 Detail Research Online Projektbericht, CO₂-neutrale Wärmeversorgung mit Wasser (<http://www.detailresearch.de/aktuelle-entwicklungen/architektur/artikel/freiburgleben-wohnen-am-schlossberg>)
- Energieinitiative Baden-Württemberg, Vortrag Contracting mit Umsetzungsbeispiel Freiburg am 19.04.12 Haus der Wirtschaft in Stuttgart am 05.07.12 in Friedrichshafen in der Zeppelin Universität am 18.10.12 in Göppingen am 15.11.12 in Müllheim am 5.12.12 in Neckarsulm im Auditorium
- Interkommunaler Austausch Ostfildern – Rheinach am 13.10.12 in Ostfildern
- regelmäßige Projektvorstellungen vor Ort, in Form von „Regiostrom-Touren“ und für die Eigentümer/Bewohner
- Pressemitteilungen des Betreibers badenova (https://www.badenova.de/web/de/ueberbadenova/presse_1/presse-service.htmlwww.badenova.de)
- Projektvorstellung als Referenzblatt und in der Broschüre „5 Jahre badenova WÄRMEPLUS“ auf <https://www.badenovawaermeplus.de>

vorgestellt. Die Messergebnisse der Anlage sind online auf der Homepage von EGS-plan abrufbar. Der Abschlussbericht wird auf der Homepage von EGS-plan zum Download bereitgestellt.