

**ImmoTherm GmbH , Stuttgart**

**Bauvorhaben Terrot-Areal in Stuttgart-Bad Cannstatt**

**Wärmeversorgung mit Wärmepumpe und  
Abwasserkanal-Wärmetauscher**

**Abschlussbericht**

**Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt  
Az 27080-24/2**



Stuttgart, den 31.01.2013

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](http://www.egs-plan.de)  
[info@egs-plan.de](mailto:info@egs-plan.de)

## Bezugsquelle:

**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](http://www.egs-plan.de)  
[info@egs-plan.de](mailto:info@egs-plan.de)

**ImmoTherm GmbH , Stuttgart**

**Bauvorhaben Terrot-Areal in Stuttgart-Bad Cannstatt**

**Wärmeversorgung mit Wärmepumpe und  
Abwasserkanal-Wärmetauscher**

**Abschlussbericht**

**Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt  
Az 27080-24/2**



Stuttgart, den 31.01.2013

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](http://www.egs.plan.de)  
[info@egs-plan.de](mailto:info@egs-plan.de)

06/02 <b>Projektkennblatt</b>		der <b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>		 <b>DBU</b>	
Az	27080-24/2	Referat	14	Fördersumme	<b>125.000 €</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Bauvorhaben Terrot-Areal in Stuttgart-Bad Cannstatt Wärmeversorgung mit Wärmepumpe und Abwasserkanal-Wärmetauscher</b>			
<b>Stichworte</b>		Nutzung lokaler Ressourcen, Wärme aus Abwasser, Geringe Emissionen, Innerstädtische Revitalisierung, Niedertemperaturwärme			
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
		24.02.2009		31.05.2011	
Zwischenberichte		Projektphase(n) -			
<b>Bewilligungsempfänger</b>		ImmoTherm GmbH Heusteigstraße 29, 70180 Stuttgart		Tel 0711 / 2381-381 Fax 0711 / 2381-382	
		Projektleitung Herr Ulf Kühn			
		Bearbeiter Herr Wolfgang Drexler			
<b>Kooperationspartner</b>		Ingenieurgesellschaft für Energie-, Gebäude- und Solartechnik, EGS-plan, Herr Dr. Mahler Gropiusplatz 10, 70563 Stuttgart, Tel 0711 / 99 007-5, Fax 0711 / 99 007-99			
<b>Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens</b>					
<p>Innerstädtische Revitalisierung eines ehemaligen Produktionsgeländes mit Sanierung und Neubau. Reduzierung des Primärenergiebedarfes durch guten baulichen Wärmeschutz und den Einsatz von intelligenter Technik mit Wärmepumpe und BHKW. Nutzung der lokalen Ressource Wärme aus Abwasser. Innovative Wärmeverteilung im Nahwärmenetz zur Optimierung der Wärmeerzeugung. Durch die eingesetzten Maßnahmen kann der CO<sub>2</sub>-Ausstoss für die Wärmeversorgung der Gebäude um mehr als 40 % gesenkt werden. Die Nutzung von Abwärme aus Abwasser soll erprobt und weiter entwickelt werden</p>					

### ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

Auf Basis einer Energiekonzeptstudie wurde die Umsetzung der Versorgungsvariante Elektrische Wärmepumpe mit Abwasserwärme, Gas-Blockheizkraftwerk (BHKW) und Gas-Spitzenkessel beschlossen. Diese Variante verbindet die Vorteile einer Wärmeerzeugung mit geringen Emissionen vor Ort mit einer relativ großen Einsparung von Primärenergie bzw. CO<sub>2</sub>-Emissionen von über 40 %.

Die Wärmepumpe mit ca. 155 kW<sub>th</sub> stellt die Grundlast zur Verfügung. Mit einem im Abwasserkanal (Hauptsammelkanal) in der Daimlerstraße unweit vom Baugebiet (Entfernung ca. 100 m) eingebauten Abwasser-Wärmetauscher wird dem Abwasser Wärme entzogen und der Wärmepumpe als Quelle zugeführt. Die Abwassertemperaturen von im Jahresmittel etwa 16 °C (Min. 8 °C, Max. 22 °C) führen zu relativ hohen Wärmequellentemperaturen. Damit sind mit der Wärmepumpe abhängig von der Heizungsvorlauftemperatur Arbeitszahlen von über 4,0 erreichbar. Das BHKW mit 100 kW<sub>th</sub> und 50 kW<sub>el</sub> und die Wärmepumpe speisen zur hydraulischen Entkopplung von Wärmeverteilung und Erzeugung jeweils in einen Pufferspeicher mit 5.000 Liter ein. Die beiden Speicher sind in Serie geschaltet. Das BHKW erzeugt den Antriebsstrom für die Wärmepumpe, wodurch ein wesentlicher Teil der CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden kann. Die Abwärme aus dem BHKW wird dazu genutzt, den Vorlauf der Kombination Wärmepumpe / Gas-BHKW durch Mischung der Vorläufe aus den beiden Pufferspeichern auf die erforderliche Systemtemperatur von ca. 70 °C für die Einspeisung in die Wärmeversorgung anzuheben. In Spitzenlastzeiten oder bei Ausfall von Wärmepumpe oder BHKW speist der Gas-Niedertemperaturkessel mit der Leistung von ca. 575 kW in die Wärmeversorgung ein.

Spezielle Wärmeübergabestationen mit Auskühlung des Rücklaufes aus der Erwärmung der Warmwasserzirkulation über die Heizung lassen niedrige Rücklauftemperaturen erwarten. Durch die Vernetzung der Stationsregler mit der zentralen DDC und das Monitoring der Gesamtanlage über zwei Jahre soll der Anlagenbetrieb optimiert werden.

## Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung .....	6
2	Projektbeschreibung und Zielsetzung .....	9
2.1	Baugebiet „Seelberg Wohnen“ .....	9
2.2	Energiekonzept.....	10
3	Aufbau und Funktionsbeschreibung der Anlage zur Wärmeversorgung.....	11
3.1	Heizzentrale.....	11
3.2	Wärmeverteilnetz und Hausstationen .....	14
3.3	Hauptkomponenten der Wärmeversorgung .....	15
3.3.1	Abwasser-Wärmetauscher.....	15
3.3.2	Wärmepumpe .....	20
3.3.3	Gas-Blockheizkraftwerk .....	21
3.3.4	Gas-Niedertemperaturkessel .....	21
3.3.5	MSR-Technik.....	21
4	Umsetzung .....	23
4.1	Baugebiet .....	23
4.2	Nahwärmeversorgung.....	23
4.2.1	Heizzentrale und Wärmeverteilung .....	23
4.2.2	Abwasser-Wärmetauscher AWT .....	25
5	Kosten .....	28
6	Zeitplan.....	29
7	Monitoring.....	30
7.1	Wärmepumpe .....	30
7.2	Abwasser-Wärmetauscher.....	32
7.3	Heizkennzahl der Kombination BHKW – Wärmepumpe / „Gasmotor- Wärmepumpe“ .....	34
7.4	Hydraulik Nahwärmeverteilnetz und Wärmeübergabestationen .....	35
7.5	Wärmebilanz.....	36
7.6	CO <sub>2</sub> - Emissionen .....	37
8	Betriebsoptimierung.....	38
9	Zusammenfassung und Empfehlungen.....	41
10	Veröffentlichungen.....	43
11	Literaturverzeichnis.....	43

## Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Lageplan Baugebiet Seelberg Wohnen und Prinzip-Schema Wärmeversorgung .....	9
Abbildung 2: CO <sub>2</sub> -Emissionen der untersuchten Varianten für die Wärmeversorgung .....	10
Abbildung 3: Jahresdauerlinie Wärmeversorgung Terrot-Areal.....	11
Abbildung 4: Hydraulik- und Funktionsschema der Wärmeversorgung Terrot-Areal.....	12
Abbildung 5: Messwerte der Abwassertemperaturen im Hauptklärwerk (Beruhigungsbecken).....	13
Abbildung 6: Messungen im Abwasserkanal .....	15
Abbildung 7: Arten von Abwasser-Wärmetauschern (oben)und Abmessungen des Kanals im Projekt Terrot-Areal (links) .....	16
Abbildung 8: Ausführungskonzept Abwasserwärmetauscher der Fa. Uhrig mit Thermliner A .....	17
Abbildung 9: Ausführungskonzept Abwasserwärmetauscher der Fa. Uhrig mit Thermliner B .....	19
Abbildung 10: Elektrische Wärmepumpe ca. 170 kW, 4-stufig.....	21
Abbildung 11: Anlagenschema Heizzentrale (oben) und Hausstation (unten) an der GLT in der Heizzentrale .....	22
Abbildung 12: Lageplan Baugebiet Terrot Areal mit Nahwärmeversorgung .....	23
Abbildung 13: Blick in den Heizraum mit installierter Heizzentrale .....	24
Abbildung 14: Hausstation mit Warmwasserspeicher .....	25
Abbildung 15: Einbringung der Wärmetauscher-Elemente in den Abwasserkanal .....	26
Abbildung 16: Wasserhaltung und Umfahrung seitlicher Einlauf im Bereich Wärmetauscher.....	27
Abbildung 17: Fertig gestellter Abwasser-Wärmetauscher im Kanal, hydraulische Anbindung .....	28
Abbildung 18: Zeitplan aus dem Förderantrag Stand 2008 und Stand Anfang 2013.....	29
Abbildung 19: Kennfeld der Wärmepumpe (Angaben des Herstellers Fa. Simaka) mit COP und Messpunkten im Betrieb .....	30
Abbildung 20: Kennfeld der Wärmepumpe (Angaben des Herstellers Fa. Simaka) mit Heizleistung und Messpunkten im Betrieb .....	31
Abbildung 21: Messwerte der Jahresarbeitszahl und der monatlichen Arbeitszahlen der Wärmepumpe und der Abwasser- und Außentemperatur .....	32
Abbildung 22: Kennfeld Abwasser-Wärmetauscher (Angaben des Herstellers Fa. Uhrig) .	32
Abbildung 23: Messwerte (15 Minutenwerte) der Leistung Abwasser-Wärmetauscher und der Abwassertemperatur.....	33
Abbildung 24: Kombination Gas-BHKW und Elektro-Wärmepumpe („Gasmotor- Wärmepumpe“), Berechnung der Heizkennzahl.....	34

Abbildung 25: Messwerte Vor- und Rücklauftemperaturen und Durchfluss im Wärmeverteilnetz.....	35
Abbildung 26: Messwerte der Verluste in der Heizzentrale und im Wärmeverteilnetz Bezug: Eingespeiste Wärmemenge Erzeuger.....	36
Abbildung 27: Berechneter jährlicher Wärmebedarf laut Energiekonzept und entsprechend EnEV-Nachweisen.....	36
Abbildung 28: Anteile der Wärmeerzeuger an der Wärmeversorgung .....	37
Abbildung 29: CO <sub>2</sub> – Emissionen für das Betriebsjahr 2012 aus den Messungen.....	37
Abbildung 30: Messwerte Stromverbrauch der Wärmepumpe und Stromproduktion BHKW .....	38
Abbildung 31: Auslastung der Wärmeerzeuger.....	38
Abbildung 32: Wärmeerzeugungskosten der unterschiedlichen Wärmeerzeuger .....	39
Abbildung 33: Jährliche Wärmeerzeugungskosten Ist-Zustand und Optimierung .....	41
Tabelle 1: Vergleich der Kostenschätzung und den abgerechneten Kosten Stand Schlussrechnung Ende Januar 2013 (Nettokosten ohne Mehrwertsteuer) ..	29

## Begriffe, Abkürzungen und Definitionen

AWT	Abgas-Wärmetauscher
AWWT	Abwasser-Wärmetauscher
AWWN	Abwasserwärmenutzung
AZ	Arbeitszahl = Verhältnis von erzeugter Wärmemenge zu verbrauchter Strommenge einer Wärmepumpe
BHKW	Blockheizkraftwerk
COP	Coefficient of Performance = Kennwert einer Wärmepumpe = Verhältnis momentane 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
Grädigkeit	Temperaturdifferenz zwischen Primärseite und Sekundärseite am Wärmetauscher
Heizkennzahl	Verhältnis von erzeugter Wärmemenge zu eingesetzter Gasmenge
JAZ	Jahresarbeitszahl = Verhältnis von erzeugter Wärmemenge zu verbrauchter Strommenge einer Wärmepumpe pro Jahr



---

KfW 60	Energiestandard
MSR	Mess-, Steuer- und Regeltechnik
WMZ	Wärmemengenzähler
WP	Wärmepumpe
WW	Trinkwarmwasser
°C	Temperatur
h	Stunde
K	Temperaturdifferenz
kW	Leistung
kWth	Thermische Leistung
kWel	Elektrische Leistung
kWh	Energiemenge
Liter/Sekunde	Durchfluss
L/h	Durchfluss
m <sup>2</sup>	Fläche
m <sup>3</sup> /h	Durchfluss
MWh	Energiemenge
W/m <sup>2</sup> K	Wärmedurchgang

## 1 Zusammenfassung

Im Projekt Terrot-Areal für das Bauvorhaben Seelberg Wohnen wurde die Wärmeversorgung mit **Elektrischer Wärmepumpe, Abwasserwärmenutzung, Gas-Blockheizkraftwerk** und **Gas-Spitzenkessel** realisiert. Das Bauvorhaben beinhaltet die Revitalisierung eines innerstädtischen Quartiers mit Sanierung und Neubau. Insgesamt entstanden auf dem Gelände der ehemaligen Strickmaschinenfabrik Terrot etwa 17.500 m<sup>2</sup> Wohn- bzw. Nutzfläche. Neu gebaut wurden Mehrfamilienhäuser, ein Pflegeheim und Seniorenwohnungen. In einem sanierten Bestandsgebäude entstanden ein Kindergarten sowie weitere Seniorenwohnungen. Alle Gebäude wurden mit einem guten baulichen Wärmeschutz entsprechend KfW60 realisiert.

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 Hauptkomponenten Wärmepumpe und Abwasser-Wärmetauscher in der Leistungsbeschreibung ein Kennfeld vorzugeben und die Leistung der Komponenten jeweils im Betrieb zu überprüfen. Der Einbau der dafür benötigten Messtechnik ist in jedem Fall sinnvoll und zu empfehlen. Zusätzlich wird empfohlen für die Betriebsoptimierung mindestens im ersten Betriebsjahr detaillierte Messungen an der Anlage durchzuführen. 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 Jahresende 2012 abgeschlossen. Die Inbetriebnahme der Anlage zur Wärmeversorgung im Automatikbetrieb war im April 2011. Die abgerechneten Kosten liegen etwas über der Kostenschätzung von 2008.

Die Leistungsfähigkeit von Abwasser-Wärmetauscher und Wärmepumpe wurde im Betrieb überprüft. Beide Anlagenkomponenten erfüllen die Anforderungen entsprechend Leistungsverzeichnis. Die anfänglich häufigen Störungen der elektrischen Wärmepumpe konnten beseitigt werden. Seit etwa einem Jahr läuft die Anlage weitgehend störungsfrei. Die Gebäude im zweiten Bauabschnitt waren zum Projektende im Dezember 2012 noch nicht bezogen und wurden nur mit Wärme für Bauheizung versorgt. Der in 2012 gemessene Wärmebedarf ist aus diesem Grund etwa 7 % geringer als nach Bezug dieser Gebäude.

Der Abwasser-Wärmetauscher wurde in einem in der Erschließungsstraße zum Baugebiet gelegenen großen Abwasserkanal eingebaut. Große Abwassermengen von max. 3.000 Liter/Sekunde und 500 Liter/Sekunde in der Nacht erforderten ein spezielles Konzept für den Einbau, der über Nacht erfolgen musste. Für das Projekt Terrot-Areal wurde erstmals ein speziell für große Wassermengen entwickelter Wärmetauschertyp eingesetzt.

Die Betriebsergebnisse aus den ersten beiden Betriebsjahren sind positiv. Die Vorgaben aus dem Energiekonzept werden eingehalten bzw. übertroffen. Der gemessene Deckungsanteil des innovativen Anlagenteils mit Wärmepumpe, Abwasser-Wärmetauscher und Gas-Blockheizkraftwerk liegt bei über 90 %. Die Nutzung der lokalen Ressource Abwasser, der Einsatz von intelligenter Technik und eine innovative Wärmeverteilung mit niedrigen Temperaturen reduziert im Vergleich zur Beheizung mit Gas die CO<sub>2</sub>-Emissionen um ca. 54 % bzw. ca. 180 Tonnen pro Jahr.

## 2 Projektbeschreibung und Zielsetzung

Auf dem Gelände der ehemaligen Textilmaschinenfabrik Terrot in Stuttgart-Bad Cannstatt entsteht ein neues Baugebiet mit dem Namen „Seelberg Wohnen“. Bauträger ist das Siedlungswerk Stuttgart. Die Gebäude wurden vom Architekturbüro Ackermann & Raff geplant, das den vom Bauträger ausgelobten Realisierungswettbewerb gewonnen hat. 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 CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Wärmeversorgung bei vergleichbaren Jahresgesamtkosten. Mit der Umsetzung des Energiekonzeptes sollte die Ausführung der Gebäude im KfW 60-Standard möglich sein.

### 2.1 Baugebiet „Seelberg Wohnen“

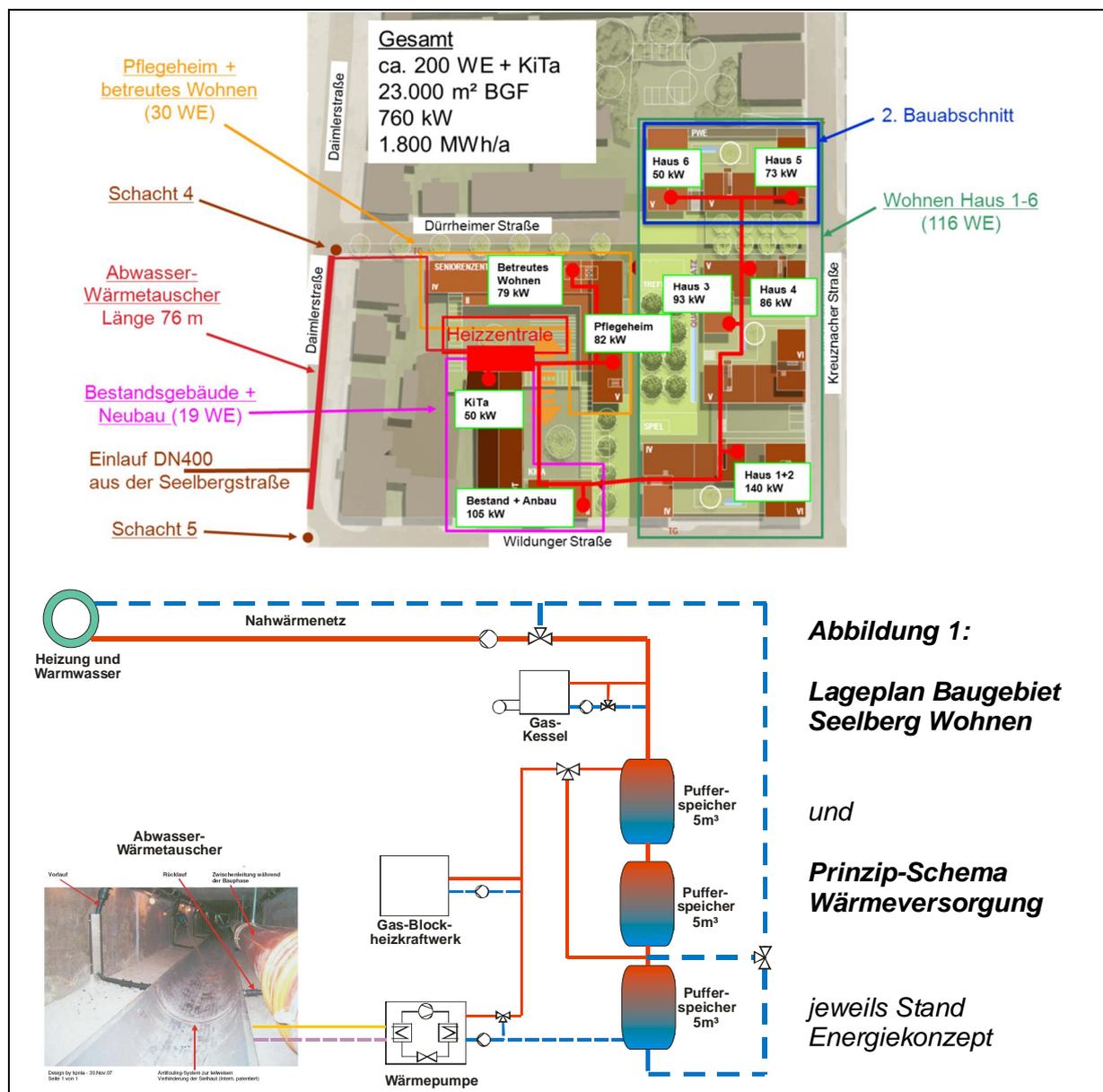
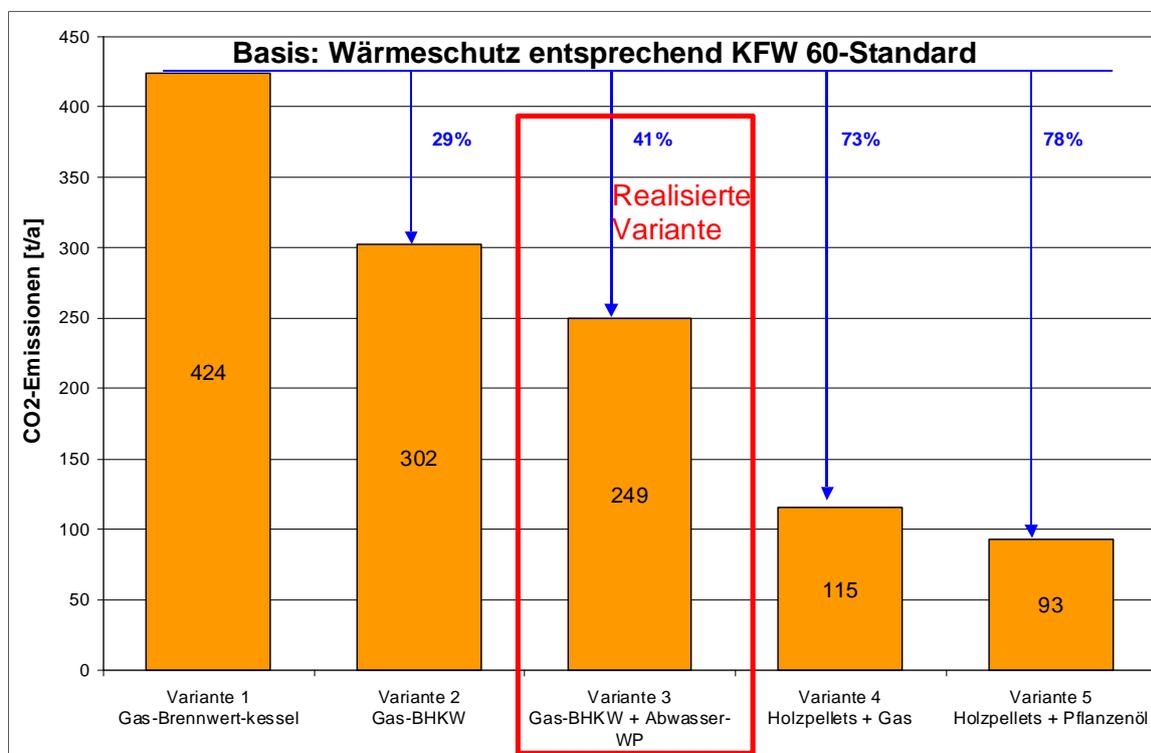


Abbildung 1 zeigt den Lageplan des Baugebietes „Seelberg Wohnen“. Im Baugebiet wurden sechs Mehrfamilienhäuser mit 111 Eigentumswohnungen und einer Gesamtwohnfläche von ca. 10.500 m<sup>2</sup> gebaut („Bereich Wohnen“ / „ETW“). Zusätzlich entstand ein großer Geschossbau mit ca. 4.300 m<sup>2</sup> Wohn- bzw. Nutzfläche, der als Kombination von Pflegeheim und Betreutes Wohnen mit 27 Wohnungen („Wohn-Pflege-Verbund“) genutzt wird. Ein bestehendes Gebäude wurde saniert und erhielt einen Anbau („Bestand mit Anbau“). Dieser Gebäudekomplex mit ca. 2.910 m<sup>2</sup> Nutzfläche beherbergt eine Kindertagesstätte und insgesamt 25 Wohnungen, bestehend aus Seniorenwohnungen, behindertengerechten Wohnungen und Mietwohnungen. Die Neubauten im Wohn-Pflege-Verbund und im Bereich Wohnen haben jeweils eine zusammenhängende Tiefgarage erhalten.

## 2.2 Energiekonzept

Im Rahmen einer Energiekonzeptstudie wurden insgesamt vier Versorgungsvarianten in Verbindung mit einer zentralen Nahwärmeversorgung untersucht und mit der Referenzvariante „Dezentrale Gas-Brennwertkessel“ verglichen. Auf Basis der Ergebnisse der Studie wurde beschlossen, die Variante mit **Elektrischer Wärmepumpe** mit **Abwasserwärmetauscher** als Wärmequelle, **Gas-Blockheizkraftwerk (BHKW)** und **Gas-Spitzenkessel** zu realisieren. Diese Variante verbindet die Vorteile einer Wärmeerzeugung mit geringen Emissionen vor Ort mit einer relativ großen Einsparung von Primärenergie bzw. CO<sub>2</sub>-Emissionen von ca. 41 %, siehe Abbildung 2. Größere Einsparungen an Primärenergie sind nur durch die Einbindung von Biomassenutzung z.B. Holzpelletsfeuerung zu erreichen und mit zusätzlichen Emissionen vor Ort (z.B. Staub) verbunden. Dies wurde aufgrund der Innenstadtlage nicht weiter verfolgt.



**Abbildung 2: CO<sub>2</sub>-Emissionen der untersuchten Varianten für die Wärmeversorgung**

Die Abbildung 3 zeigt die Jahresdauerlinie und die Anteile der unterschiedlichen Wärmeerzeuger an der Wärmeversorgung. Etwa 90 % der Wärme wird durch die Kombination Wär-

mepumpe / BHKW erzeugt, wobei 60 % von der Wärmepumpe und 30 % vom BHKW eingespeist werden. Die restlichen 10 % liefert der Gaskessel. Der Anteil der Wärme aus dem Abwasser mit ca. 690 MWh/a an der Gesamtwärmelieferung liegt bei über 45 %.

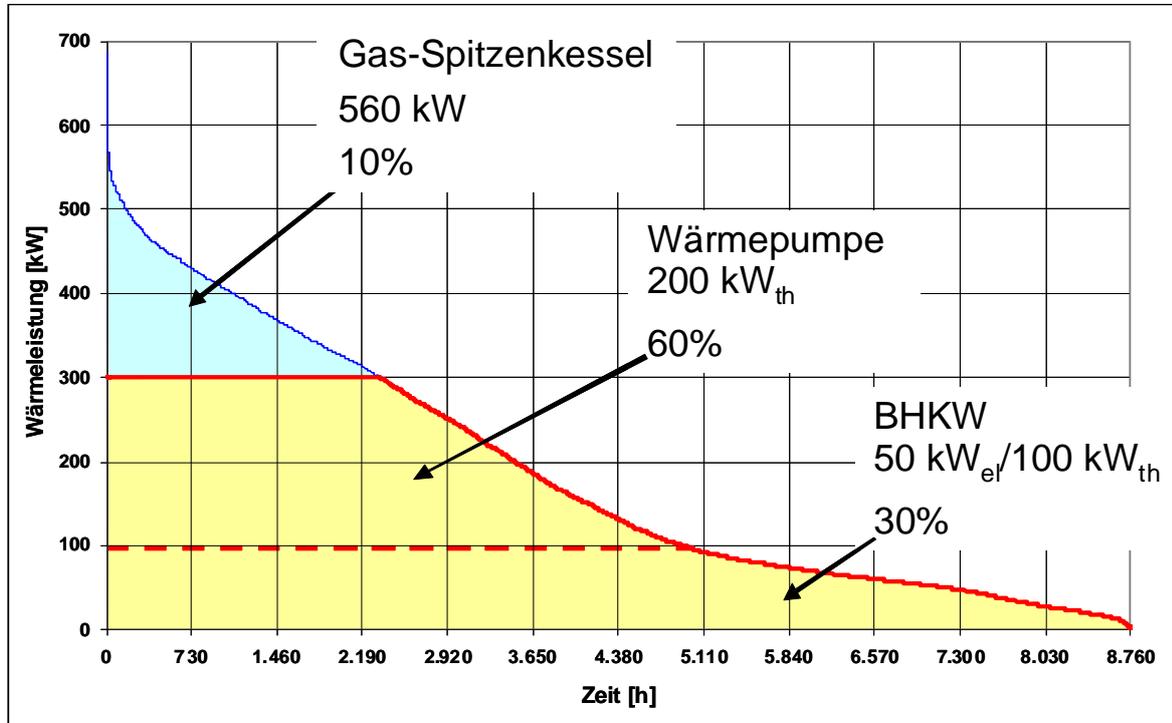


Abbildung 3: Jahresdauerlinie Wärmeversorgung Terrot-Areal

### 3 Aufbau und Funktionsbeschreibung der Anlage zur Wärmeversorgung

Betreiber der Nahwärmeversorgung ist die Firma ImmoTherm. 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 der Firma ImmoTherm 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 eine Kombination verschiedener Wärmeerzeuger bereitgestellt. Eine Wärmepumpe mit ca. 170 kW Heizleistung stellt die Grundlast zur Verfügung. Im Energiekonzept war eine Wärmepumpe mit der Heizleistung von 200 kW vorgesehen. In der Planung wurde die Leistung der Wärmepumpe auf ca. 170 kW reduziert. Damit ist sichergestellt, dass in jedem Betriebspunkt die von der Wärmepumpe und der Umwälzpumpe im Abwasser-Wärmetauscher-Kreis aufgenommene elektrische Antriebsleistung vom Gas-BHKW erzeugt wird und kein Antriebsstrom für die Wärmepumpe aus dem Stromnetz bezogen werden muss. Dies wurde aus wirtschaftlichen Gründen so festgelegt.

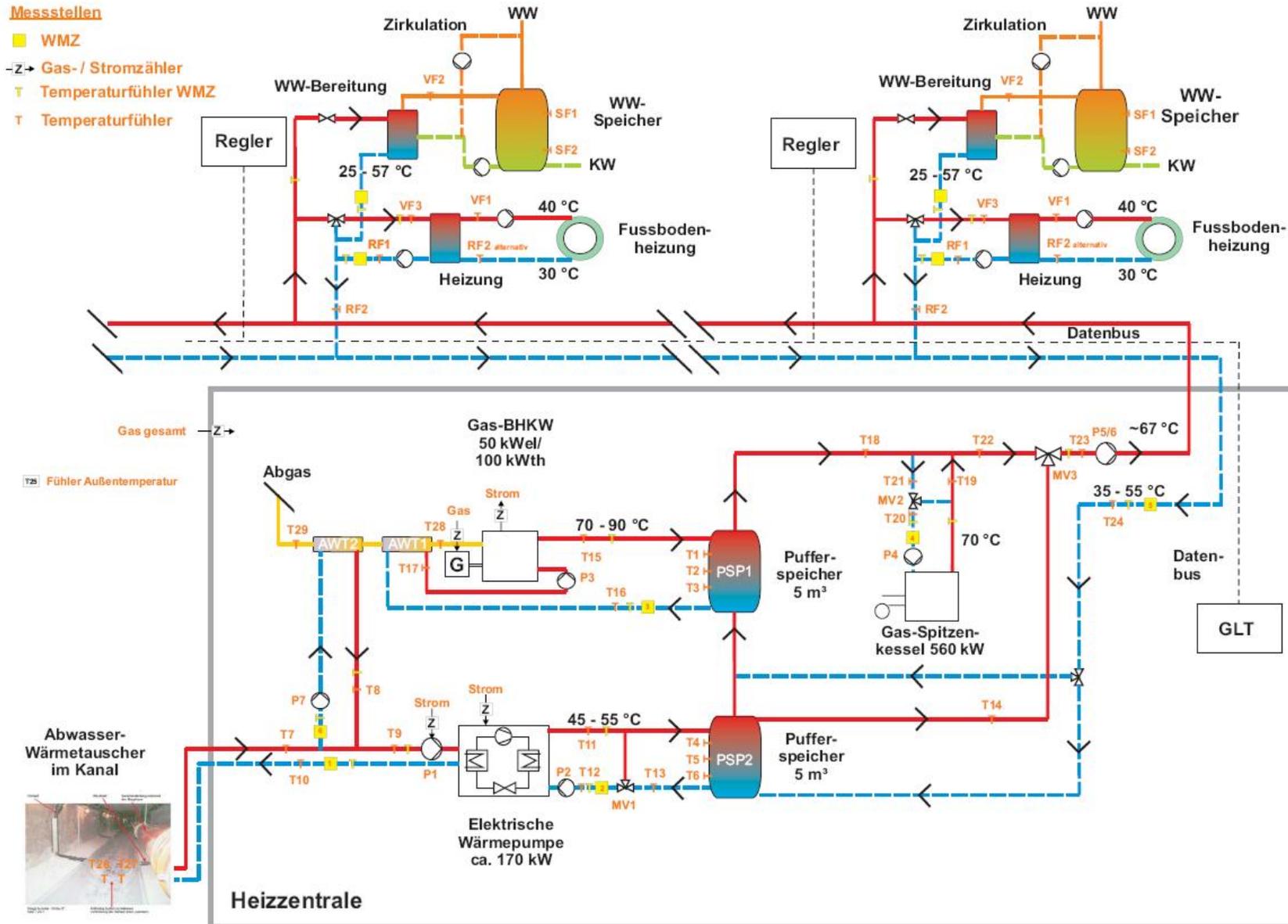
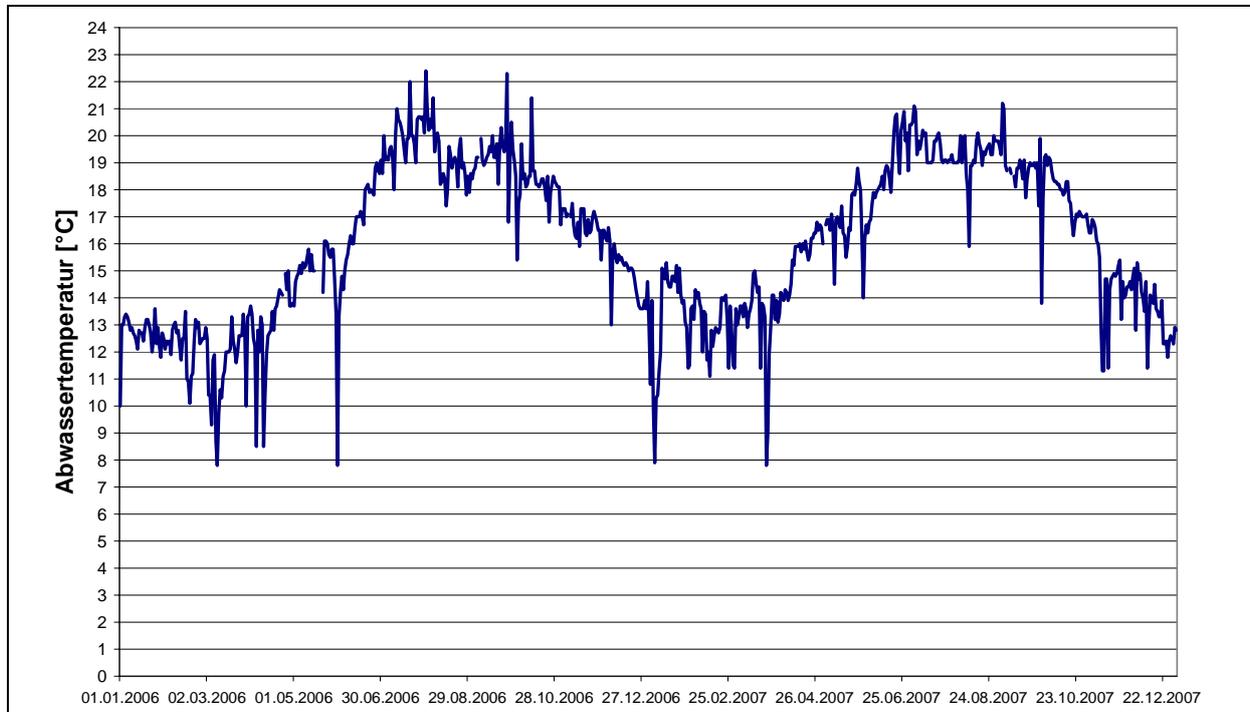


Abbildung 4: Hydraulik- und Funktionsschema der Wärmeversorgung Terrot-Areal

Als Wärmequelle wird Abwasser verwendet. Dazu wurde im Abwasserkanal (Hauptsammelkanal) in der Daimlerstraße unweit vom Baugebiet (Entfernung ca. 100 m) ein Abwasser-Wärmetauscher eingebaut. Die im Hauptklärwerk gemessene Abwassertemperatur, siehe Abbildung 5, beträgt im Jahresmittel ca. 16 °C. Das Maximum liegt im Sommer bei ca. 22 °C und das Minimum bei 8 °C im Winter.



**Abbildung 5: Messwerte der Abwassertemperaturen im Hauptklärwerk (Beruhigungsbecken)**

Aufgrund den relativ hohen Wärmequellentemperaturen sind mit der Wärmepumpe abhängig von der Heizungsvorlauftemperatur Arbeitszahlen (Verhältnis erzeugte Wärme zu eingesetztem Antriebsstrom) von über 4,0 erreichbar. Zur hydraulischen Entkopplung von Wärmeverbraucher und Wärmeerzeuger speist die Wärmepumpe in einen Pufferspeicher mit dem Volumen von 5.000 Liter 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.

In Serie zum Pufferspeicher der Wärmepumpe ist ein weiterer Pufferspeicher mit ebenfalls 5.000 Litern Inhalt geschaltet. In diesen speist das Gas-Blockheizkraftwerk (BHKW) mit der thermischen Leistung von 100 kW<sub>th</sub> und der elektrischen Leistung 50 kW<sub>el</sub> ein. Die BHKW-Abwärme, die in die Wärmeversorgung eingespeist wird, wird dazu genutzt, den Vorlauf der Kombination elektrische Wärmepumpe / Gas-BHKW auf die erforderliche Systemtemperatur zur Einspeisung in das Wärmeverteilnetz anzuheben. Im Heizbetrieb der Anlage bis Außentemperaturen von z.B. 15 °C erwärmt die Wärmepumpe den Rücklauf aus dem Wärmeverteilnetz auf ca. 45 °C. Im Sommerbetrieb bei abgeschalteten Heizanlagen in den Gebäuden liegen die Netzurücklauftemperaturen erfahrungsgemäß zwischen 45 °C und 55 °C. Die Wärmepumpe erwärmt in diesem Zeitraum den Rücklauf auf maximal 55 °C. Zur Erhaltung der Temperaturschichtung im Pufferspeicher der Wärmepumpe wird der Rücklauf aus dem Wärmeverteilnetz temperaturabhängig in einen der beiden Pufferspeicher eingespeist. Die Umschaltung erfolgt über Motorklappen. Das BHKW lädt den Pufferspeicher ganzjährig mit

ca. 70 °C. Die Vorlauftemperatur des BHKW wird durch Massenstromregelung im Speicherladekreis BHKW auf den vorgegebenen Sollwert von z.B. 70 °C eingestellt. Die Vorläufe aus den beiden Pufferspeichern werden in einem Mischventil (MV3) auf die erforderliche Vorlauf-temperatur im Wärmeverteilnetz gemischt.

Der Antriebsstrom für die Wärmepumpe wird mit dem BHKW erzeugt, wodurch ein wesentlicher Teil der CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden kann. Je nach Arbeitszahl der Wärmepumpe können mit der Kombination Elektrische Wärmepumpe – Gas-BHKW Heizkennzahlen (Verhältnis erzeugte Wärme zu eingesetztem Gas) zwischen 1,5 und 1,9 erreicht werden. Abhängig von der Einspeisevergütung für den vom BHKW erzeugten Strom und dem Strombezugspreis für den Antriebsstrom der Wärmepumpe kann es aus wirtschaftlichen Gründen sinnvoll sein, die Wärmepumpe immer gleichzeitig mit dem BHKW zu betreiben und für den Antrieb der Wärmepumpe nur den vom BHKW erzeugten Strom zu verwenden. In der Regelung kann dieser Parallelbetrieb von Wärmepumpe und BHKW vorgegeben werden. Das heißt die Wärmepumpe kann nur gleichzeitig mit dem BHKW betrieben werden. Das BHKW kann unabhängig von der Wärmepumpe eingeschaltet werden.

In Spitzenlastzeiten oder bei Ausfall von Wärmepumpe oder BHKW übernimmt der Gas-Niedertemperaturkessel mit der Leistung von ca. 620 kW die Wärmeversorgung. Dieser ist dem BHKW-Puffer nachgeschaltet.

### 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. Das Wärmeverteilnetz im Terrot Areal ist auf ca. 65 bis 67 °C Vorlauftemperatur und 35 °C Rücklauf-temperatur ausgelegt.

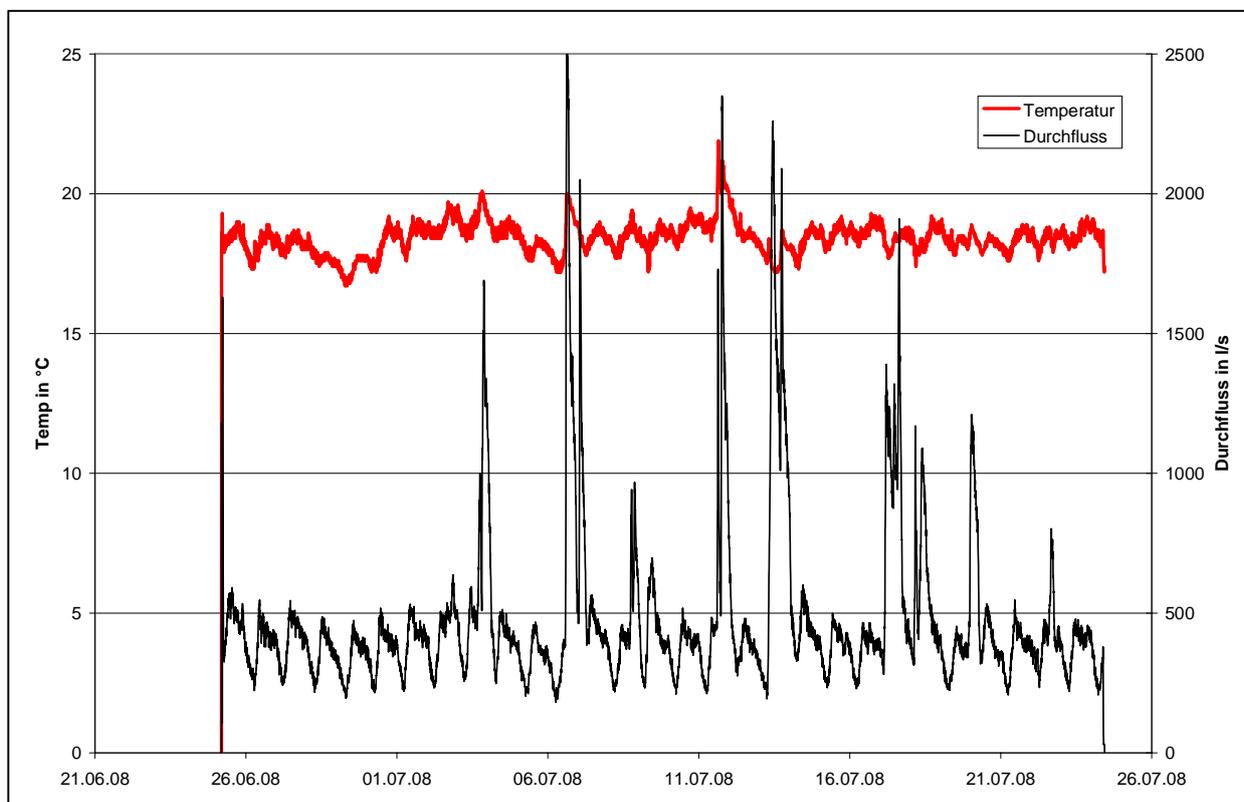
Im Hydraulik- und Funktionsschema (Abbildung 4) ist der Aufbau der Wärmeverteilung und der Hausstationen dargestellt. Alle Gebäude werden über Fußbodenheizungen mit der Auslegung **40 °C / 30 °C** (Vorlauftemperatur / Rücklauf-temperatur) beheizt. Die Warmwasserbereitung in den Stationen erfolgt mit 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 Rücklauf-temperaturen im Wärmeverteilnetz. Zusätzlich wird in der Heizperiode der Rücklauf aus der Warmwasserbereitung vorwiegend im reinen Zirkulationsbetrieb als Vorlauf für die Heizung genutzt und damit weiter abgekühlt. In der Heizperiode sind dadurch Rücklauf-temperaturen von ca. **35 °C** erreichbar.

Die zentrale DDC-Regelung wird 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 Abwasser-Wärmetauscher

Zur Nutzung der Restwärme im Abwasser wird ein Abwasser-Wärmetauscher benötigt, der im Abwasserkanal installiert wird. In Deutschland wurden bisher nur wenige Anlagen mit Wärme aus Abwasser gebaut. In der Schweiz sind bereits mehrere Anlagen in Betrieb. Die Erfahrungen im Betrieb dieser Anlagen sind positiv, wobei eine sorgfältige Dimensionierung des Wärmetauschers unbedingt notwendig ist. Aus diesem Grund waren in das Planungsteam für das Terrot-Areal Experten aus der Schweiz eingebunden. Die Planung und Ausschreibung des Abwasser-Wärmetauschers wurde durch das Schweizer Ingenieurbüro Ryser Ingenieure, Bern durchgeführt. Siehe hierzu auch /Ryser 08/. Die Auslegung des Wärmetauschers basiert auf der Abwassermenge, die in Perioden mit „Trocken“-Wetter im Kanal fließt und der Temperatur des Abwassers. Zur Ermittlung dieser Daten wurden im Sommer 2008 über vier Wochen Strömungs- und Temperaturmessungen im Kanal durchgeführt, siehe Abbildung 6.

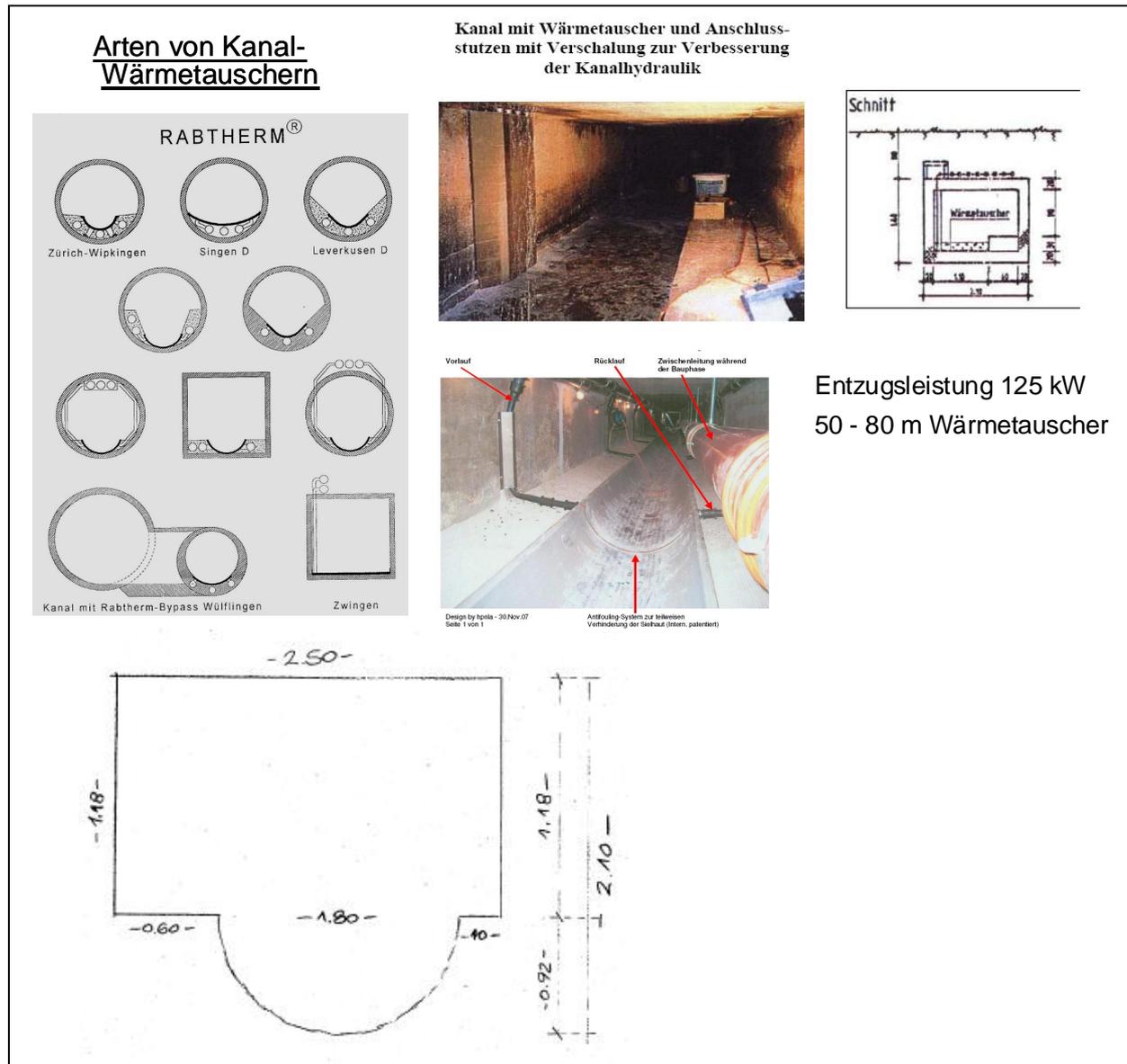


**Abbildung 6: Messungen im Abwasserkanal**

Im Messzeitraum vom 26.06.2008 bis 24.07.2008 betragen die Abwassertemperaturen im Mittel ca. 18 °C, minimal ca. 17 °C und maximal ca. 23 °C. Die gemessene Abwassermenge betrug im Mittel ca. 500 l/s. Bei Niederschlag fließen im Kanal maximal 2.500 l/s. In der Nacht sinkt der Durchfluss auf minimal 180 l/s ab. Temperaturmessungen über das ganze Jahr liegen aus Messungen im Hauptklärwerk vor, siehe Abbildung 5. Die minimale Abwassertemperatur mit ca. 8 °C tritt bei Schneeschmelze auf. Bei diesen Abwassertemperaturen, die nur an wenigen Stunden im Jahr auftreten, muss die Wärmepumpe aus Gründen des Frostschutzes außer Betrieb genommen werden. Dies stellt betriebstechnisch kein Problem dar, da die Anlage bivalent mit Gas-BHKW und Gaskessel als zusätzlichen Wärmeerzeugern aufgebaut ist.

Für die Auslegung des Wärmetauschers wurden folgende Werte verwendet:

- Abwassertemperatur 12 °C (minimal 8 °C bei Schneeschmelze)
- Grädigkeit des Wärmetauschers 1 K, d.h. Vorlauftemperatur des Wärmetauschers im Verdampferkreis der Wärmepumpe 11 °C
- Abwassermenge 200 l/s



**Abbildung 7: Arten von Abwasser-Wärmetauschern (oben) und Abmessungen des Kanals im Projekt Terrot-Areal (links)**

Die Abbildung 7 oben zeigt mögliche Ausführungen für den Abwasser-Wärmetauscher. Beim Kanal in der Daimlerstraße handelt es sich um einen Rechteckkanal mit dem Querschnitt 2,5 m x 1,2 m mit einem halbrunden Gerinne (Radius 0,9 m) am Boden, siehe Abbildung 7

linke Seite. Für die Montagezeit des Wärmetauschers muss das Abwasser bei „Trocken“-Wetter im Kanal umgeleitet werden. Dies geschieht entweder durch eine provisorische im Kanal oder außerhalb verlegte Abwasserleitung. Bei „Regen“-Wetter muss der Kanal geräumt und die Arbeiten gestoppt werden. Die Alternative mit Wärmetauscher außerhalb vom Abwasserkanal in einem separaten Bauwerk wurde aufgrund der beengten Platzverhältnisse in der Daimlerstrasse nicht weiter verfolgt.

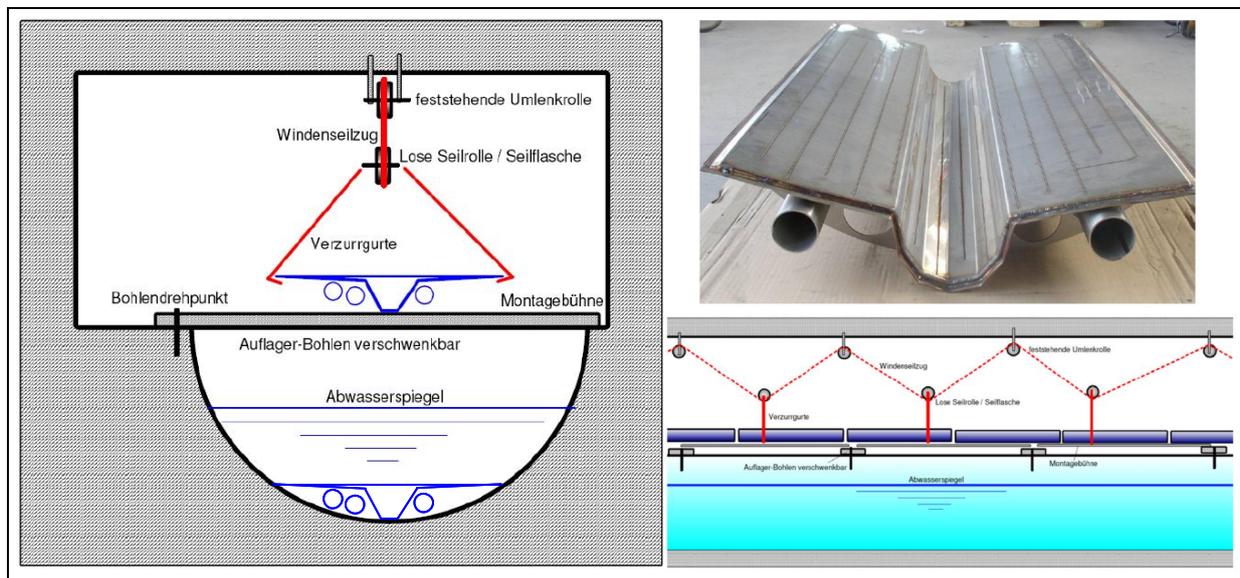
Der Ausschreibung des Wärmetauschers wurden folgende Werte zugrunde gelegt:

- Wärmetauscherleistung 118 kW
- Vorlauftemperatur im Verdampferkreis der Wärmepumpe 11 °C
- Rücklauftemperatur im Verdampferkreis der Wärmepumpe 7,4 °C
- Durchfluss im Verdampferkreis der Wärmepumpe 28,1 m<sup>3</sup>/h

bei

- Abwassertemperatur 12 °C (minimal 8 °C bei Schneeschmelze)
- Abwassermenge 200 l/s

Das günstigste Angebot (insgesamt 3 Bieter) hat die Fa. Uhrig Kanaltechnik GmbH, Geisingen mit dem System Thermliner abgegeben.



**Abbildung 8: Ausführungskonzept Abwasserwärmetauscher der Fa. Uhrig mit Thermliner A**

Die im Juni / Juli 2008 durchgeführten Messungen haben gezeigt, dass eine längere Trockenlegung des Kanalabschnittes in der Daimlerstrasse mit einer Wasserhaltung nicht möglich ist. Daher musste eine Möglichkeit für einen kurzfristigen Einbau der Wärmetauscher gefunden werden. Laut Aussage der Stadtentwässerung der Stadt Stuttgart kann in der Nacht während ca. 4 Stunden der Zufluss zum Kanalabschnitt in der Daimlerstraße abgestellt werden, indem bei Trockenwetter zwei oben liegende Regenbecken als Speicherplätze genutzt werden. Die Erfahrungen, die bei der „Trockenlegung“ des besagten Kanalabschnittes für den Einbau der Messsonden gemacht wurden, haben dies bestätigt. Die angebotene

Lösung der Firma Uhrig Kanaltechnik GmbH, siehe Abbildung 8, sieht den Einbau eines Podestes im Kanalabschnitt vor, auf dem die Wärmetauscher-Elemente zusammengesetzt werden können und in zwei bis drei Etappen während der Nacht auf die Kanalsole abgesetzt und dort befestigt werden. Die Länge des Wärmetauschers beträgt insgesamt 76 m, d.h. es werden 76 Elemente mit 1 m Länge eingebaut.

Zwischen Ausschreibung und Einbau des Abwasserwärmetauschers lagen ca. anderthalb Jahre. Die Fa. Uhrig hat in diesem Zeitraum ein neues Produkt, den Thermliner Typ B, entwickelt, siehe Abbildung 9. Der Typ Thermliner B eignet sich besonders für den Einbau in Kanälen mit großen Abwassermengen.

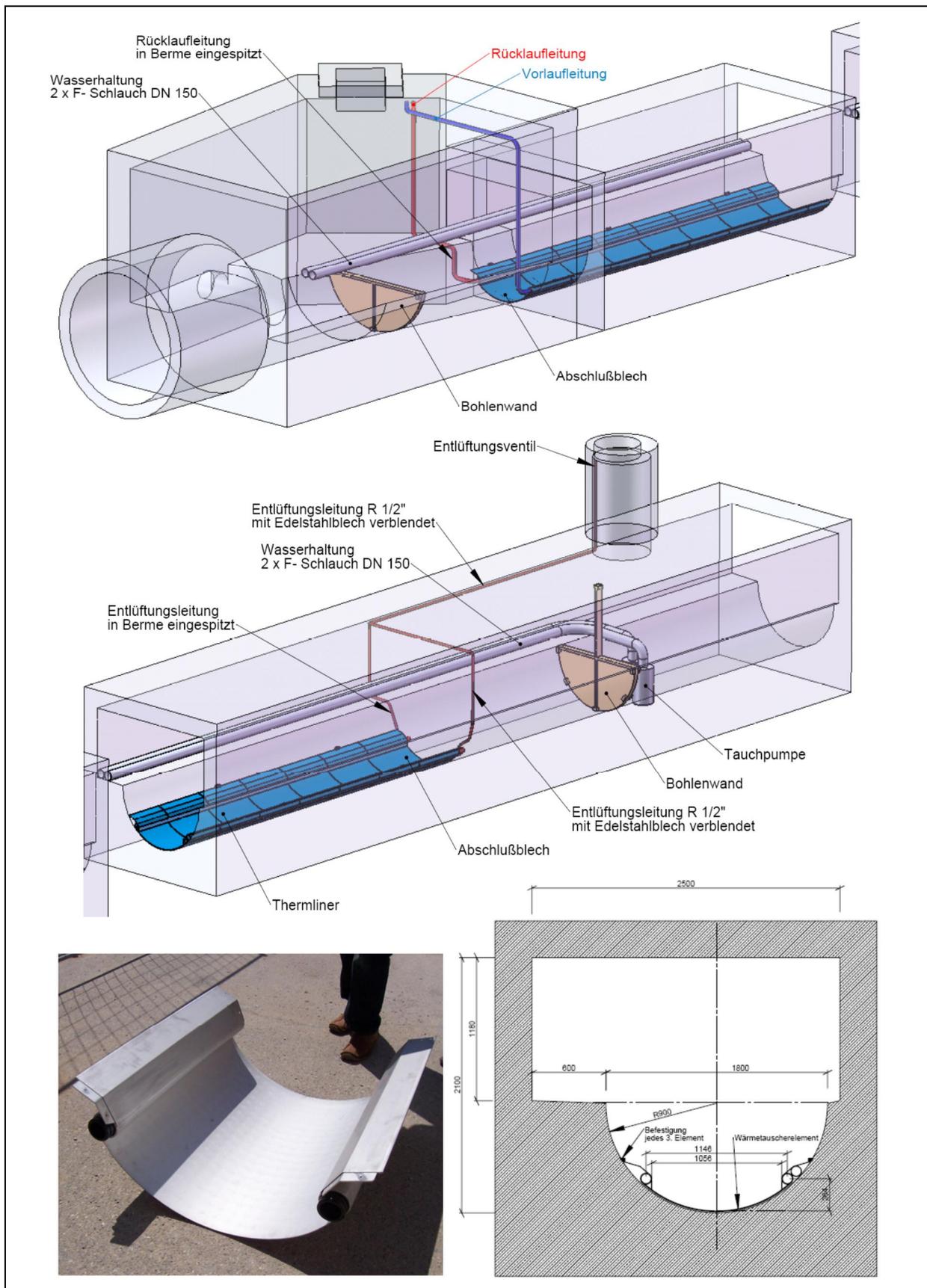
Das System Thermliner B wurde von der Fa. Uhrig im August 2009 zu den gleichen Konditionen wie der Thermliner A angeboten. Die Vorteile der Bauform B sind:

- Sehr geringe Verkleinerung Strömungsquerschnitt im Kanal
- Gute Entlüftung Wärmetauscherkreis durch oben liegende Verteilrohre  
Beim Thermliner A bildet jedes Wärmetauscher-Element einen Hochpunkt!
- Einbau in den Kanal in mehreren Abschnitten und dadurch ohne aufwändige Unterkonstruktionen möglich
- Kurze Einbauzeit

Hauptproblem beim Einbau des Wärmetauschers war wie bereits angesprochen die große Abwassermenge im Kanal in der Daimlerstraße. Hier liegt der Hauptvorteil der Bauform B. Der Wärmetauscher kann in Abschnitten eingebaut werden. Die Teilabschnitte können im „normalen“ Kanalbetrieb vom Abwasser überströmt bis zum Weiterbau verbleiben. Das System Thermliner A muss während des Einbaus, das heißt im „trockenen“ Kanal befüllt und entlüftet werden. Dies verlängert den Einbauzeitraum. Der Wärmetauscher Typ Thermliner B kann nach dem Einbau auf einmal komplett befüllt und an den wenigen Hochpunkten auch im „normalen“ Kanalbetrieb entlüftet werden. Der Einbau des Systems Thermliner B ist dadurch unkomplizierter und schneller.

Der Einbau des Podestes für den Zusammenbau der Teilstrecken beim Thermliner A stellt ein zusätzliches Risiko dar. Bei sehr starkem Regen kann der Wasserstand im Kanal über das halbrunde Gerinne ansteigen, so dass die Gefahr besteht, dass das Podest und halb fertige Teilstrecken weggespült werden und diese unter Umständen erhebliche Schäden im nachfolgenden Kanalsystem anrichten können bzw. die Wärmetauscherelemente bis zur Unbrauchbarkeit beschädigt werden.

Der Wärmetauscher sollte ursprünglich im Oktober 2009 eingebaut werden. Aufgrund von Verzögerungen beim Rohbau der Gebäude wurde der Einbau auf das Frühjahr 2010 verschoben. Dadurch wurde etwas Zeit zur Prüfung des alternativ angebotenen Systems „Thermliner B“ gewonnen. Im Herbst 2009 fiel die Entscheidung, den Thermliner B einzubauen.



**Abbildung 9: Ausführungskonzept Abwasserwärmetauscher der Fa. Uhrig mit Thermliner B**

Nachfolgend sind die wichtigsten technischen Daten des installierten Abwasser-Wärmetauschers zusammengestellt (Quelle: Revisionsunterlagen der Fa. Uhrig):

Fabrikat:	Fa. Uhrig Kanaltechnik
Typ:	Thermliner B
Länge Wärmetauscherelement:	1 m,
Breite Wärmetauscherelement:	ca. 1,5 m,
Breite Wärmetauscherelement in der Abwicklung:	1,49 m
Anzahl Wärmetauscherelemente	76 Stück + 1 Blindelement beim Einlauf DN400
Gesamte überströmte Wärmetauscherfläche	ca. 98 m <sup>2</sup> bzw. 1,29 m <sup>2</sup> pro lfd. m
Sielhautfaktor zur Berücksichtigung des Biofilms	0,41
Wärmedurchgangskoeffizient ohne Biofilm	0,9 W/m <sup>2</sup> K
Wärmedurchgangskoeffizient mit Biofilm	0,53 W/m <sup>2</sup> K
Thermische Leistung AWWT im Auslegungspkt.	120 kW
Durchfluss im AWWT	28,7 m <sup>3</sup> /h
Eintritts- / Austrittstemperatur im AWWT	120 kW
Logarithmische Temperaturdiff. im Auslegungspkt.	2,3 K
Abkühlung Abwasser durch Wärmeentzug	0,14 K

### 3.3.2 Wärmepumpe

Ausgeschrieben war eine 4-stufige elektrische Wärmepumpe mit ca. 160 kW Leistung bei Verdampfeintritt (Vorlauf Wärmequelle) von 11 °C und Kondensatoraustritt (Vorlauf Heizkreis) von 55 °C. Als Kältemittel war R134a ausgeschrieben. Die Maschine ist mit zwei Kältemittelkreisläufen und vier 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. Im Leistungsverzeichnis waren drei Fabrikate alternativ angefragt. Zur Ausführung kam die Wärmepumpe Fabrikat Simaka, 88260 Argenbühl. Die Maschine hat 151 kW im beschriebenen Auslegungspunkt. Die Maschine ist kompakt aufgebaut und zusammen mit der Steuerung in einem Gehäuse mit den Maßen 2 m x 0,8 m x 1,8 m (Breite x Tiefe x Höhe) untergebracht.



**Abbildung 10: Elektrische Wärmepumpe ca. 170 kW, 4-stufig**

### 3.3.3 Gas-Blockheizkraftwerk

Das Gas-BHKW wurde separat ausgeschrieben. Zur Ausführung kam ein Modul Fabrikat Comuna-Metall mit der thermischen Nennleistung von 97 kW<sub>th</sub> ohne Brennwertwärmetauscher und der elektrischen Leistung von 50 kW<sub>el</sub>. Für das Gas-BHKW wurden zwei Abgas-Wärmetauscher zur Abgaskondensation beide optional ausgeschrieben. Die Wärmetauscher werden in den Rücklauf zum BHKW und in den Vorlauf vom Abwasser-Wärmetauscherkreis (Wärmequellenkreis der Wärmepumpe) eingebaut, siehe Abbildung 4. Der Wärmetauscher im Rücklauf wird immer zusammen mit dem BHKW betrieben und hat abhängig von der Rücklauftemperatur eine Leistung von 6 bis 14 kW. Der Wärmetauscher im Wärmequellenkreis wird nur beim gleichzeitigen Betrieb von BHKW und Wärmetauscher betrieben und zur Anhebung des Wärmequellenvorlaufes für die Wärmepumpe genutzt. Dieser Wärmetauscher hat eine Leistung von 12 bis 13 kW. Das Abgas wird in den in Serie geschalteten Wärmetauschern bis unter 20 °C abgekühlt. Mit beiden Wärmetauschern in Betrieb sind Wirkungsgrade von deutlich über 100 % erreichbar. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Wärmetauscher ergab eine Amortisationszeit von 2 bis 3 Jahren. Beide Wärmetauscher wurden eingebaut.

### 3.3.4 Gas-Niedertemperaturkessel

Als Spitzenkessel wurde ein Gas-Niedertemperaturkessel Fabrikat Viessmann vom Typ Vitoplex 300 mit der Leistung von 620 kW eingebaut. Der Kessel ist in den Vorlauf nach dem BHKW-Pufferspeicher eingebunden. Sobald die Temperatur im Pufferspeicher nicht mehr für die Einspeisung in die Wärmeversorgung ausreicht, wird der Gaskessel in Betrieb genommen und die Vorlauftemperatur auf die erforderliche Vorlauftemperatur im Wärmeverteilnetz angehoben.

### 3.3.5 MSR-Technik

Zur Regelung der Gesamtanlage wird eine zentrale Steuerung (DDC) mit Gebäudeleitzentrale (GLT) in der Heizzentrale eingesetzt, siehe Abbildung 11. 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 Regelungs-

funktionen zentral über die DDC ausgeführt werden. Die Anlage kann über den Telefonanschluss in der Heizzentrale fern überwacht werden. Störmeldungen werden automatisch an Mobiltelefone, Email-Adressen oder Faxgeräte 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 Seite 12 sind alle Messstellen in der Anlage eingezeichnet.

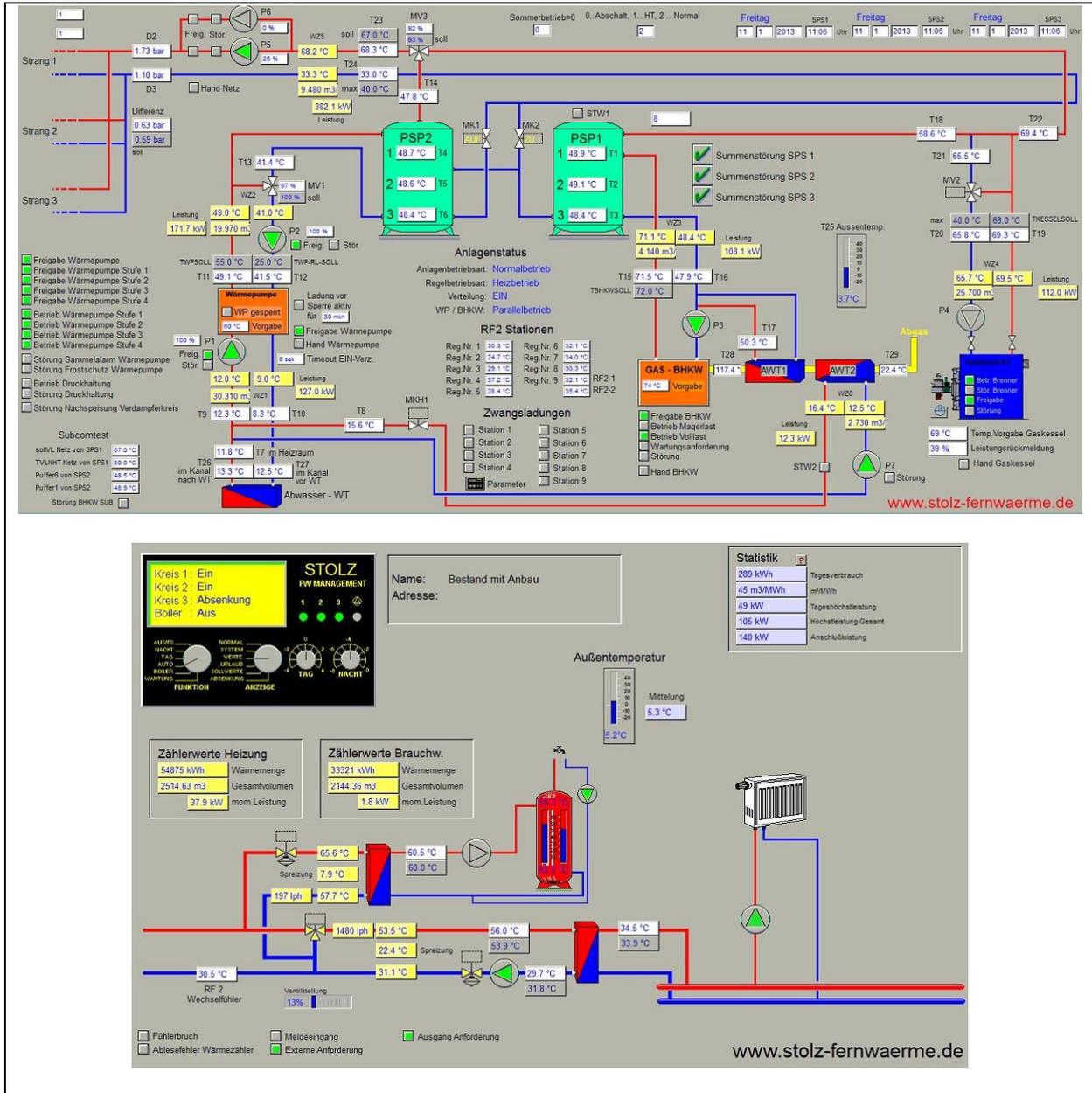
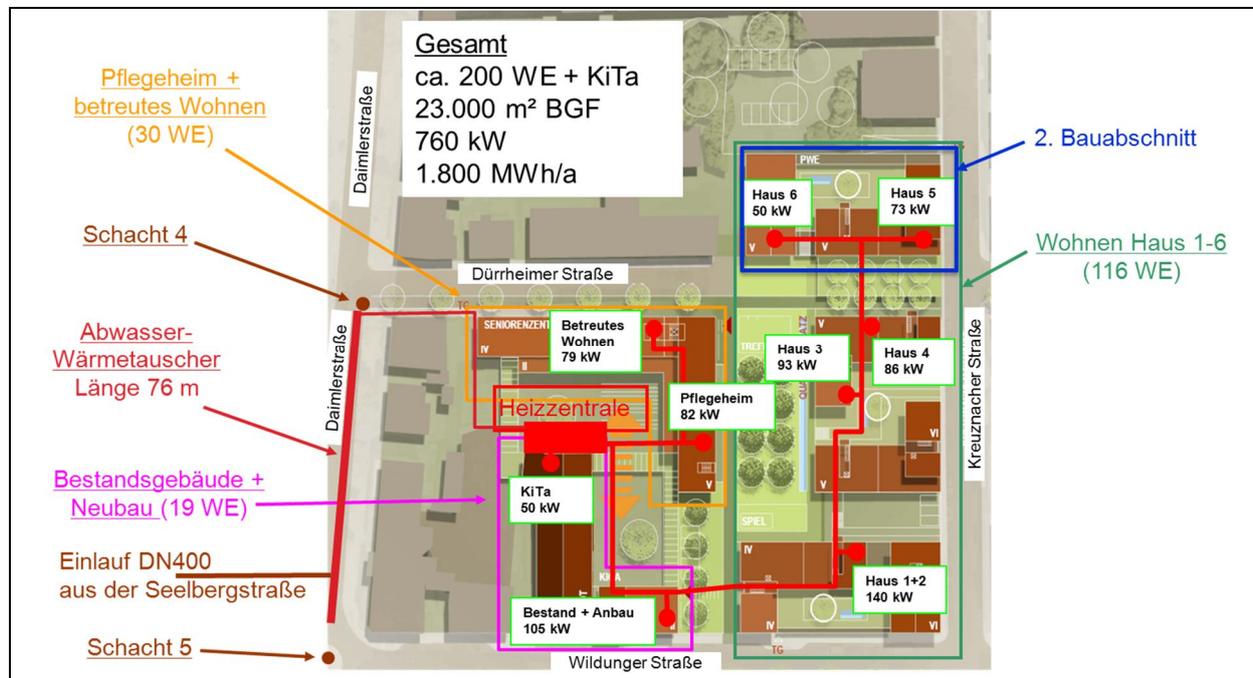


Abbildung 11: Anlagenschema Heizzentrale (oben) und Hausstation (unten) an der GLT in der Heizzentrale

## 4 Umsetzung

### 4.1 Baugebiet



**Abbildung 12: Lageplan Baugebiet Terrot Areal mit Nahwärmeversorgung**

Das Baugebiet Terrot-Areal / „Seelberg Wohnen“ wird in zwei Bauabschnitten erstellt. Der erste Bauabschnitt umfasst alle Gebäude ohne Haus 5 und 6 und ist in die Teilbereiche „Eigentumswohnungen“ (Haus 1 bis 4) und das „Pflegerwohnverbund / Bestand mit Anbau“ (Pflegeheim, Betreutes Wohnen, Bestandsgebäude mit Behindertengerechten Eigentumswohnungen und Kindergarten) unterteilt. Mit dem Rohbau der Gebäude im ersten Bauabschnitt 1 wurde im Frühjahr 2009 begonnen. Die ersten Wohnungen in den Häusern 1 bis 4 wurden im Januar 2011 übergeben bzw. bezogen. Mit Stand Ende Juni 2011 sind 70 der 76 Wohnungen bezogen. Das Betreute Wohnen und das Pflegeheim wurden im Mai / Juni 2011 übergeben. Ende Juni waren 16 der 27 Wohnungen im Betreuten Wohnen bezogen. Die 25 Wohnungen im Bestandsgebäude mit Anbau werden im Juli und der Kindergarten im September 2011 zur Nutzung übergeben.

Mit dem Rohbau der Gebäude im zweiten Bauabschnitt (Haus 5 und 6) wurde im Juni 2011 begonnen. Mit der Fertigstellung und Bezug der Gebäude ist bis März 2013 zu rechnen. Im Vergleich zum Zeitplan im Förderantrag ergibt sich für die Hochbauten eine zeitliche Verschiebung von ca. 1,5 Jahren. Berücksichtigt man den zweiten Bauabschnitt, so ergibt sich eine Verschiebung von ca. 3 Jahren.

## 4.2 Nahwärmeversorgung

### 4.2.1 Heizzentrale und Wärmeverteilung

Der Heizraum im Bereich der Tiefgarage Pflegerwohnverbund / Bestand mit Anbau wurde erst im Frühjahr 2010 fertig gestellt. Der Bau der Heizzentrale konnte im April 2010 beginnen. Dadurch ergibt sich im Vergleich zum Zeitplan im Förderantrag eine zeitliche Verschiebung von ca. 1 Jahr. Die Heizzentrale wurde bis Juli 2010 installiert.



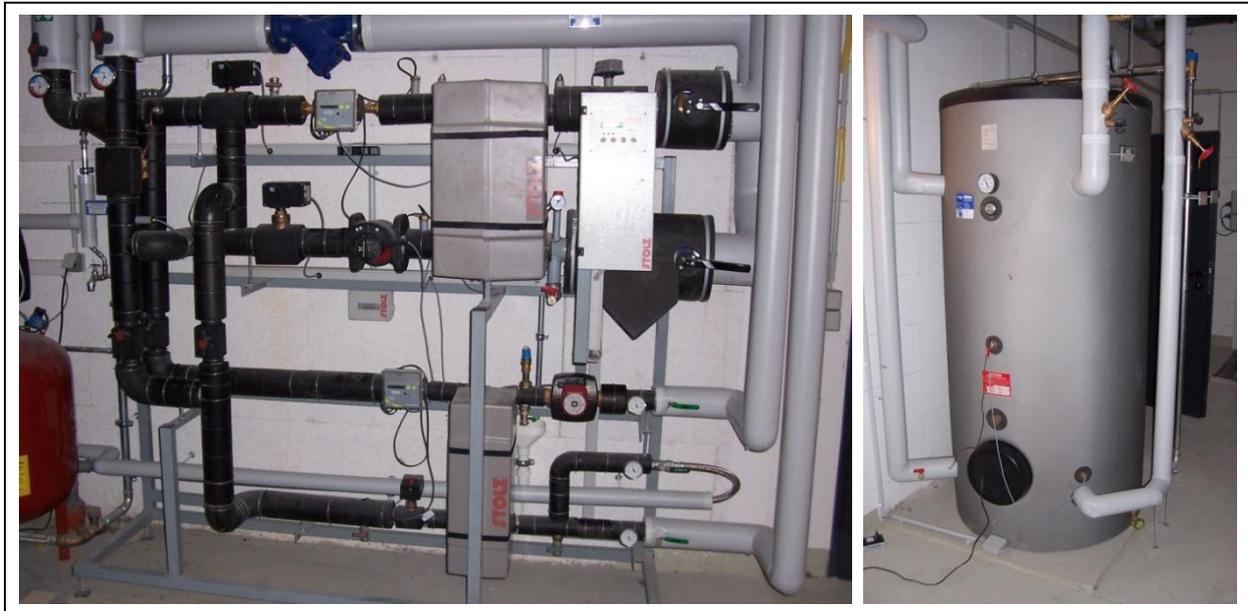
**Abbildung 13: Blick in den Heizraum mit installierter Heizzentrale**

Aufgrund statischer Anforderungen musste der Heizraum mit dem Boden in zwei unterschiedlichen Höhen ausgeführt werden. Gaskessel und BHKW stehen im erhöhten Bereich, die Pufferspeicher, die Wärmepumpe und die Schaltschränke DDC und BHKW im abgesenkten Bereich, siehe Abbildung 13.

Parallel zur Installation der Heizzentrale wurden die Wärmeverteilung zu den Gebäuden 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.

Der Gaskessel wurde im August 2010 zur Estrichrocknung in den Gebäuden Haus 1 bis 4 auf Hand in Betrieb genommen. Der Stromanschluss für die Heizzentrale wurde erst im September 2010 hergestellt. Dadurch konnte die Zentrale mit Wärmepumpe und BHKW erst Ende September 2010 in Betrieb gehen. Aufgrund des fehlenden Telefonanschlusses, der bereits im April 2010 beantragt wurde, konnte die MSR-Technik nicht vollständig in Betrieb genommen und überprüft werden. Die Anlage konnte bis zur Installation des Telefonschlusses im Mai 2011 nicht fern überwacht werden. Messdaten konnten bis dahin nicht erfasst werden. Die Funktion der MSR-Technik konnte erst danach überprüft werden. Das Monitoring wurde im Juli 2011 in Betrieb genommen. Die letzten Mängel in der MSR-Technik und im Monitoring konnten bis Ende Oktober 2011 beseitigt werden. Seit November 2011 läuft die Anlage störungsfrei und es stehen alle Messdaten für die Auswertung zur Verfügung.

Die Gebäude im zweiten Bauabschnitt wurden bis Ende 2012 fertiggestellt und sind seit August 2012 an die Nahwärmeversorgung angeschlossen, wobei im Herbst 2012 ausschließlich Wärme für Estrichtrocknung und Bauheizung verbraucht wurde. Die Gebäude werden bis März 2013 bezogen.



**Abbildung 14: Hausstation mit Warmwasserspeicher**

#### 4.2.2 Abwasser-Wärmetauscher AWT

Der Abwasser-Wärmetauscher wurde im März / April 2010 im Kanal in der Daimlerstraße eingebaut. In diesem Zeitraum wurde auch die Anbindung des Wärmetauschers an die Heizzentrale hergestellt. Der Einbau des Wärmetauschers einschließlich aller Stemm- und Putzarbeiten, sowie die Herstellung des hydraulischen Anschlusses mit Entlüftung und Druckprobe dauerte ca. vier Wochen. Die Monteure der Fa. Uhrig konnten aufgrund der oben beschriebenen großen Abwassermengen im Kanal nur während der 4 bis 5 Stunden nachts zwischen 0 und 5 Uhr arbeiten. In der Nacht von Sonntag auf Montag und von Freitag auf Samstag konnte nicht gearbeitet werden. Das heißt pro Woche standen 4 Nächte für die Montage im Kanal zur Verfügung. Probleme mit der Abdichtung der hydraulischen Verbindungen zwischen den Wärmetauscherelementen haben zu Verzögerungen geführt, konnten jedoch kurzfristig gelöst werden. Letztendlich wurden 11 Nächte im Kanal gearbeitet. Der Wärmetauscher wurde nach der erfolgreichen Druckprobe im Anschluss an die Montage gefüllt und ist seither dicht. Die Abbildungen 15 bis 17 zeigen Aufnahmen vom Einbau und vom fertig gestellten Wärmetauscher im Kanal.



**Abbildung 15: Einbringung der Wärmetauscher-Elemente in den Abwasserkanal**

Die Wärmetauscherelemente wurden durch den Einstieg im Schacht 4 im Bereich Ecke Daimlerstraße / Dürrheimerstraße, siehe Abbildung 12, in den Kanal eingebracht und im Kanal an die Einbaustelle transportiert, siehe Abbildung 15.

Abbildung 16 links zeigt eine Aufnahme der Wasserhaltung mit Bohlenwand und Tauchpumpe am Schacht 5 im Kreisverkehr Kreuzung Daimlerstraße / Wildunger Straße stromaufwärts der Wärmetauscherstrecke im Kanal. Trotz Schließen der Schieber in den beiden Regenbecken musste zusätzlich noch in den Kanal zulaufendes Abwasser vor der Baustelle im Kanal abgesaugt, an der Baustelle vorbei- und nach der Baustelle wieder in den Kanal eingeleitet werden. Die Wasserhaltung musste in jeder Nacht, in der im Kanal gearbeitet wurde, neu aufgebaut werden. Die Stuttgarter Stadtentwässerung hat die Montage während der vier Wochen in jeder Nacht, in der im Kanal gearbeitet wurde, mit Personal und Geräte (z.B. Spülwagen) begleitet. Das heißt der Aufwand zur Einrichtung und Betreuung der Baustelle war relativ groß.

Während der 3,5 Wochen Einbauzeit konnte in zwei Nächten wegen Regenwetter nicht gearbeitet werden. Die fehlerhafte Abdichtung zwischen den Elementen hat die Montagezeit um zwei Nächte verlängert. Aufgrund der Osterfeiertage konnten weitere Nächte nicht für die Montage genutzt werden. Die Fa. Uhrig hat zwischenzeitlich die Verbindungstechnik auf Basis von Standardkupplungen verbessert. Die Technik wurde bereits bei neueren Anlagen erfolgreich eingesetzt. Die Abdichtung der Verbindung der Wärmetauscherelemente ist dadurch wesentlich zuverlässiger und schneller herzustellen. Ohne „Dichtigkeitsprobleme“ reduziert sich die Einbauzeit für den Wärmetauscher auf ca. 24 Stunden mit einem Drei-

Mann-Montageteam. Dazu kommen noch die Anschlussverrohrung und die Einrichtung der Baustelle mit Wasserhaltung. Für den Wärmetauscher im Terrot-Areal reduziert sich die Anzahl der Montagezeit auf etwa 2/3 damit auf 8 Nächte bzw. 2 Wochen.



**Abbildung 16: Wasserhaltung und Umfahrung seitlicher Einlauf im Bereich Wärmetauscher**

Innerhalb der Wärmetauscherstrecke befindet sich ein Einlauf mit dem Durchmesser 400 mm aus der Seelbergstraße. Der Einlauf mündet an der Kanalsohle. Dies bedeutet, dass der Wärmetauscher im Bereich der Einmündung unterbrochen werden musste. Gegenüber der Einmündung wurde ein Blindelement (halbes Wärmetauscherelement) eingebaut. Auf der Seite der Einmündung wurden die beiden Elemente rechts und links neben der Einmündung mit einer Rohrleitung hydraulisch verbunden. Die Verbindungsleitung wurde in der Kanalwand eingespitzt eingebaut, siehe rechte Aufnahme in Abbildung 16. Der so entstandene zusätzliche Hochpunkt wurde separat entlüftet.

Von allen Hochpunkten der Wärmetauscherstrecke (Anzahl 3) wurden Entlüftungsleitungen (DN25) bis in den Schacht 5, siehe Abbildung 12, verzogen und dort mit einem Kugelhahn mit Kappe verschlossen. Der Wärmetauscher kann so bequem im Schacht 5 entlüftet werden, ohne dass der Kanalquerschnitt betreten werden muss.



**Abbildung 17: Fertig gestellter Abwasser-Wärmetauscher im Kanal, hydraulische Anbindung**

Die Abbildung 17 zeigt Aufnahmen vom fertig gestellten Wärmetauscher im Kanal während der Abnahme, die ebenfalls nachts stattgefunden hat. Das linke Bild zeigt ein Teilstück der Wärmetauscherstrecke. Jedes Wärmetauscherelement wurde mit einer Lasche an der Kanalwand befestigt. Die rechten Bilder zeigen die hydraulische Anbindung des Wärmetauschers an die Wärmepumpe in der Heizzentrale mit Kunststoffleitungen DN125 im Schacht 4 (Bild rechts oben) und den Auslauf des Wärmetauschers im Kanal, die sogenannte „Anrampung“, ausgeführt durch „Anputzen“ mit Mörtel (Bild rechts unten). Der Einlauf der Wärmetauscherstrecke stromaufwärts wurde mit Blechen ausgeführt. Im Kanal wurden zwei Temperaturfühler einer am Einlauf und einer am Auslauf der Wärmetauscherstrecke eingebaut. Die Fühler sind auf die Gebäudeleittechnik (GLT) aufgeschaltet. Mit den beiden Fühlern kann die Abkühlung des Abwassers über die Wärmetauscherstrecke gemessen werden.

## 5 Kosten

Die Anlage ist mit Stand Ende Januar 2013 komplett abgerechnet. Die nachfolgende Tabelle 1 zeigt den Vergleich zwischen der Kostenschätzung im Rahmen der Vorplanung 2008 und den abrechneten Kosten Stand Schlussrechnung Ende Januar 2013. Die Gesamtkosten für die Wärmeversorgung laut Abrechnung liegen etwa 3 % über der Kostenschätzung von 2008. Die Mehrkosten für den Abwasser-Wärmetauscher sind hauptsächlich für den aufwändigen Einbau aufgrund der großen Abwassermenge entstanden. Weitere Mehrkosten sind bei der MSR-Technik, Elektroinstallation und Planung entstanden. Beim innovativen Anlagenteil BHKW + Wärmepumpe + Einbindung und bei der Nahwärme (Netz + Stationen) gibt es keine Mehrkosten.

	Kostenschätzung	Abgerechnete Kosten Stand Juni 2011
Heizzentrale mit Gaskessel	116.000,-	117.300,-
Pufferspeicher	enthalten	17.400,-
BHKW inkl. Einbindung	90.000,-	79.200,-
Wärmepumpe	80.000,-	49.700,-
Einbindung Wärmepumpe hydraulisch	enthalten	23.100,-
Abwasser-Wärmetauscher inkl. Anschluss an die Zentrale	180.000,-	185.500,-
Elektroinstallation und Inbetriebnahme	20.000,-	24.700,-
MSR-Technik	45.000,-	51.200,-
Wärmeverteilung	90.000,-	71.100,-
Wärmeübergabestationen	73.000,-	94.300,-
Planung	106.000,-	111.600,-
<b>Gesamtinvestitionskosten</b>	<b>800.000,-</b>	<b>825.100,-</b>

**Tabelle 1: Vergleich der Kostenschätzung und den abgerechneten Kosten Stand Schlussrechnung Ende Januar 2013 (Nettokosten ohne Mehrwertsteuer)**

## 6 Zeitplan

Die Abbildung 18 zeigt den Zeitplan für das Projekt Terrot-Areal. Eingetragen sind die Balken für den Stand 2008 im Förderantrag (gelb) und den aktuellen Stand Anfang 2013 (grün). Durch den langen Bauzeitraum für die Erstellung der Gebäude ergab sich eine zeitliche Verschiebung von ca. 1,5 Jahren. Die späte Installation des Telefonanschlusses für die Fernüberwachung und der späte Baubeginn für den zweiten Bauabschnitt führten zu weiteren Verzögerungen insbesondere beim Monitoring um ca. ein halbes Jahr, so dass sich der Zeitplan für das gesamte Projekt um ca. 2 Jahre verzögert hat.

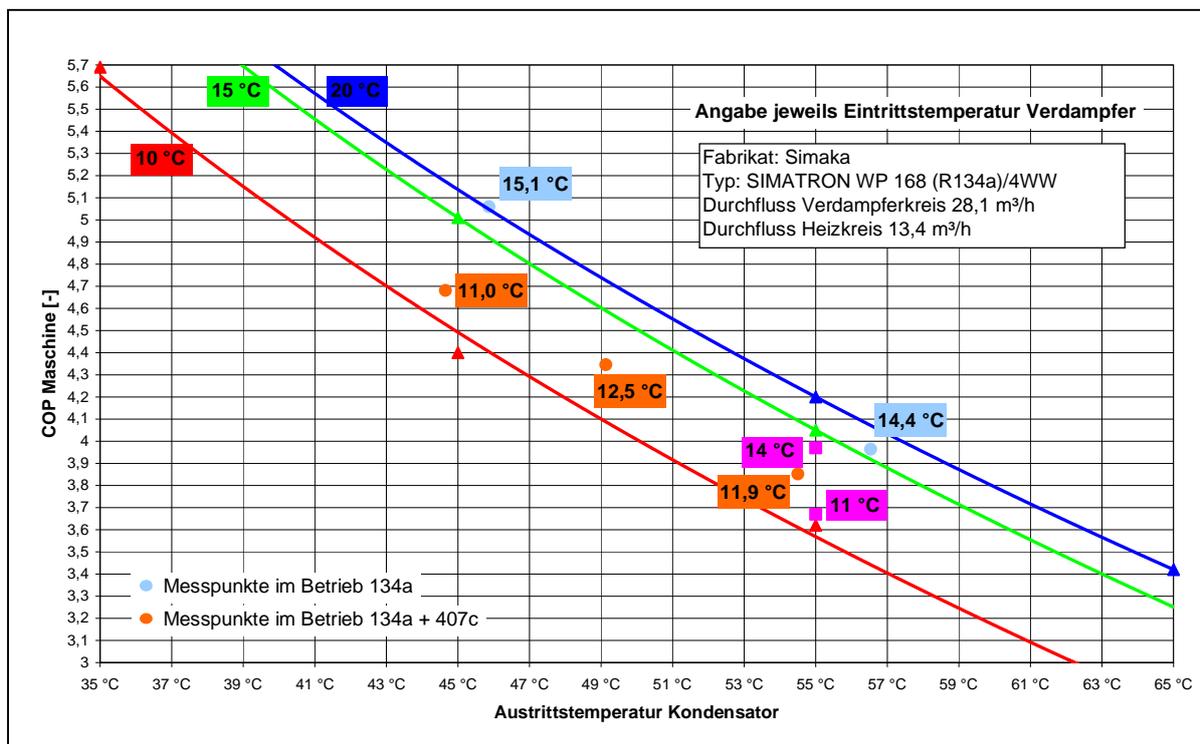
	2008	2009				2010				2011				2012			
	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Baubeginn Hochbau																	
Baubeginn Hochbau																	
Hochbau																	
Hochbau 1. Bauabschnitt																	
Hochbau 2. Bauabschnitt																	
Bau Wärmezeugung																	
Bau Wärmezeugung																	
Bau Netz und Stationen 2. BA																	
Einbau Messtechnik																	
Einbau Messtechnik																	
Einbau Messtechnik 2. BA																	
Monitoring und Optimierung																	
Monitoring und Optimierung																	

**Abbildung 18: Zeitplan aus dem Förderantrag Stand 2008 und Stand Anfang 2013**

## 7 Monitoring

### 7.1 Wärmepumpe

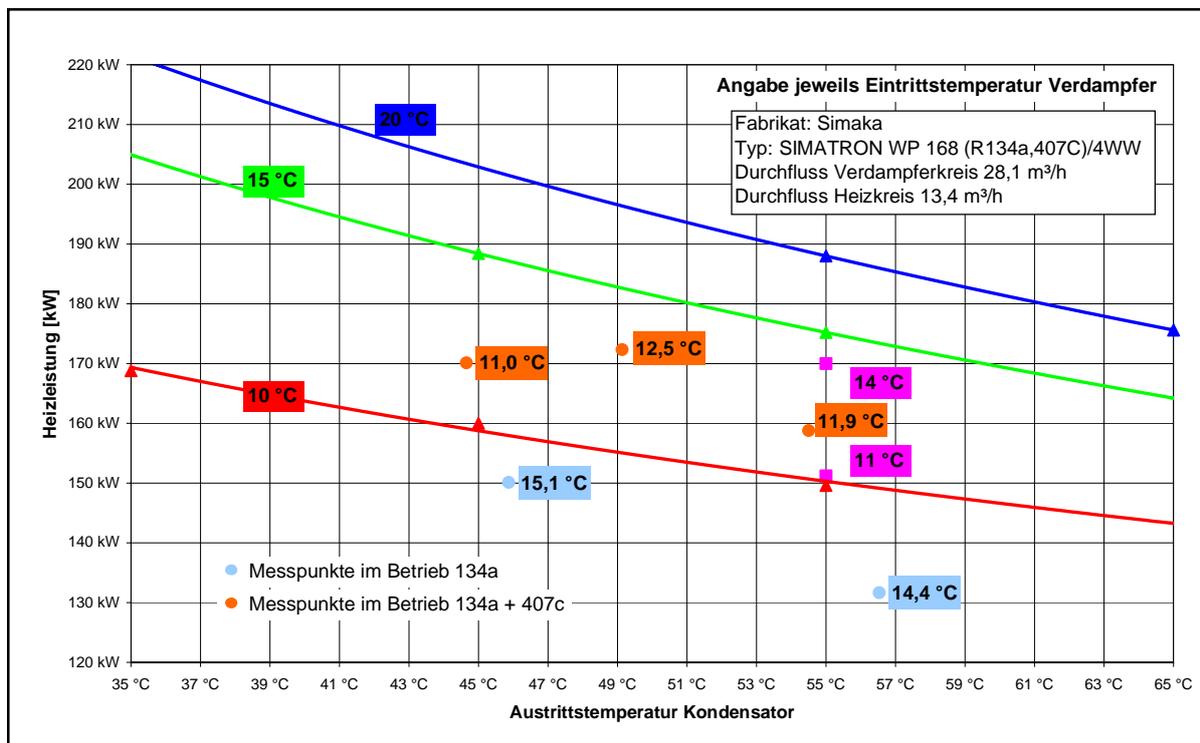
Im Leistungsverzeichnis wurde ein Kennfeld für die Wärmepumpe gefordert, welches dem Angebot für die Wärmepumpe beigelegt werden musste. Das Kennfeld beinhaltet neun Betriebspunkte mit unterschiedlichen Eintrittstemperaturen Verdampfer und Austrittstemperaturen Kondensator. Für jeden Betriebspunkt muss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



**Abbildung 19: Kennfeld der Wärmepumpe (Angaben des Herstellers Fa. Simaka) mit COP und Messpunkten im Betrieb**

Die Abbildung 19 zeigt das Kennfeld für die Wärmepumpe Fabrikat Simaka. Im Diagramm ist die Leistungszahl der Wärmepumpe COP über der Heizungsvorlauftemperatur (Austrittstemperatur Kondensator) für verschiedene Vorlauftemperaturen der Wärmequelle (Verdampfeintrittstemperatur) aufgetragen. Die Leistungszahl der Maschine COP 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 20 °C sowie die magentafarbene Punkte sind Angaben des Herstellers Fa. Simaka.

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 hellblauen Messpunkte in Abbildung 19 sind die Ergebnisse der ersten Messungen im November 2010. Das COP ist deutlich besser als im Kennfeld angegeben.



**Abbildung 20: Kennfeld der Wärmepumpe (Angaben des Herstellers Fa. Simaka) mit Heizleistung und Messpunkten im Betrieb**

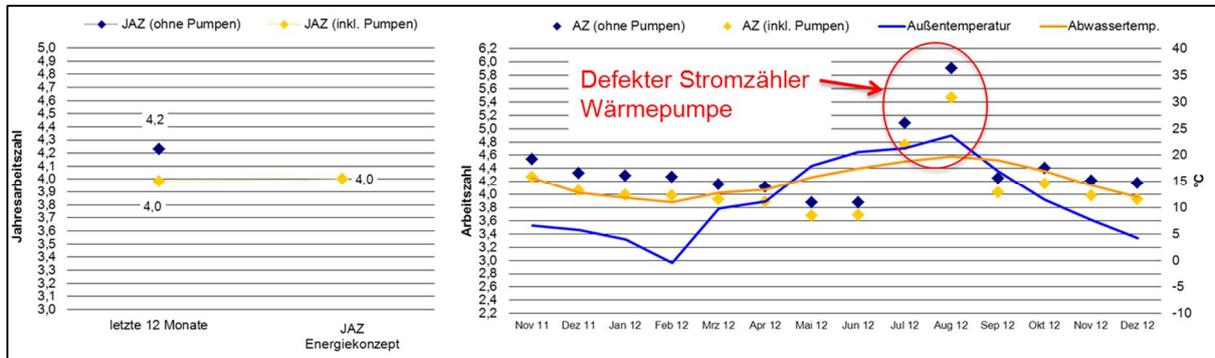
Die Überprüfung der Heizleistung (thermische Leistung Kondensator) der Anlage, siehe Abbildung 20, ergab 20 bis 25 % zu geringe Leistungen (hellblaue Messpunkte). Aus diesem Grund wurde die Abnahme der Wärmepumpe verweigert und der Hersteller aufgefordert die Anlage so nachzubessern, dass die Vorgaben bzgl. Leistung und COP entsprechend Leistungsverzeichnis erfüllt werden.

Die Ergebnisse der Messungen nach der Nachbesserung durch den Hersteller sind in Abbildung 19 und Abbildung 20 als orangefarbene Punkte dargestellt. Berücksichtigt man die Messungenauigkeit von Wärmemengenzähler und Stromzähler zusammen mit ca. 5 %, so liegen das COP und die Heizleistung der Maschine im Kennfeld, das heißt die Vorgaben entsprechend Leistungsverzeichnis werden eingehalten.

Seit Ende Mai 2011 ist die Fernüberwachung aktiv. In dieser Zeit ging die Wärmepumpe sehr häufig in Störung. Im Zeitraum Anfang Juni bis Anfang Juli 2011 war die Wärmepumpe dauerhaft in Störung. Aufgrund von Überlastung konnte der Hersteller die Mängel erst Anfang Juli beseitigen. Im Zeitraum Anfang Juli 2011 bis Mitte Juli 2012 lief die Wärmepumpe fast störungsfrei. Im Zeitraum Juli, August und September 2012 sind wieder Störungen aufgetreten. Der Grund war ein defekter Hauptschalter. Zusätzlich war im Juli einer der beiden Stromzähler der Wärmepumpe defekt und konnte bis August nicht ausgelesen werden.

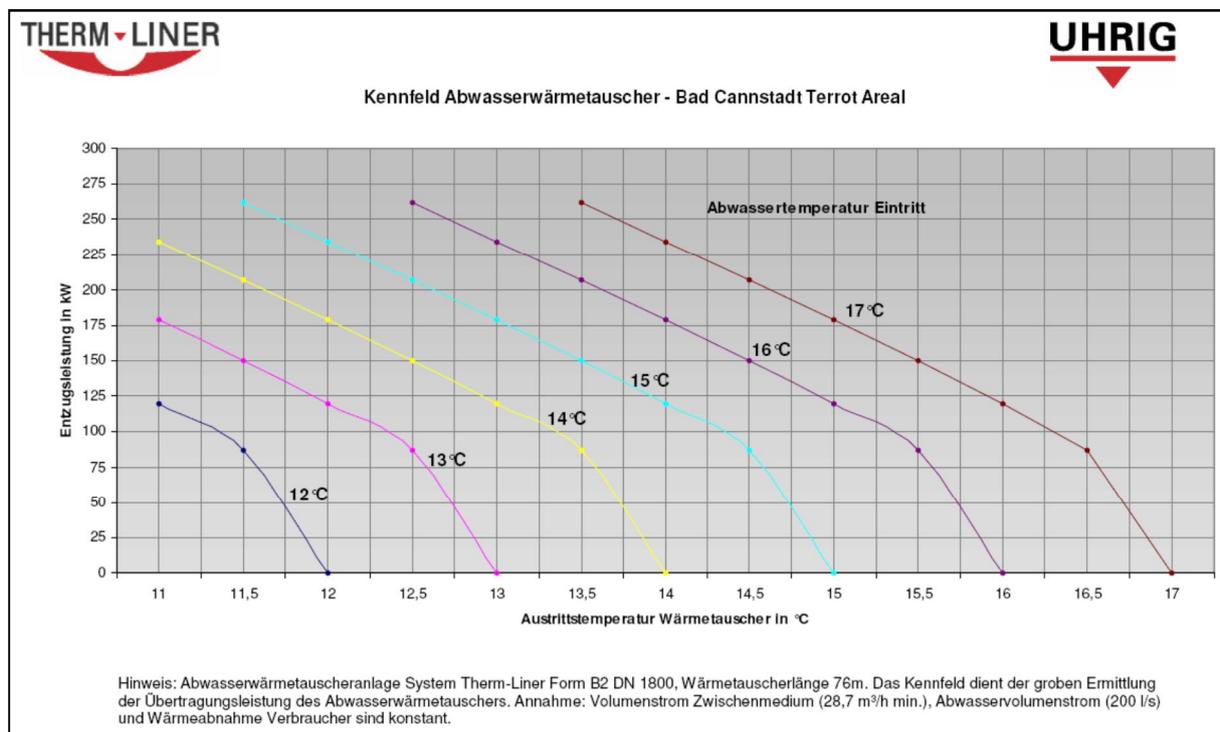
Die Abbildung 21: Messwerte der Jahresarbeitszahl und der monatlichen Arbeitszahlen der Wärmepumpe und der Abwasser- und Außentemperatur zeigt die gemessenen Arbeitszahlen für die Wärmepumpe. Der Stromverbrauch der Verdampferkreispumpe wurde dabei berücksichtigt. Die im Juli und August 2012 gemessenen Arbeitszahlen sind bedingt durch den defekten Stromzähler falsch. Die monatlichen Arbeitszahlen liegen zwischen 3,5 und 4,3. Im

Sommerbetrieb beträgt der Sollwert für die Wärmepumpe 57 °C im Heizbetrieb 52°C, wobei die Wärmepumpe im Heizbetrieb die meiste Zeit mit geringeren Vorlauftemperaturen unter 50 °C betrieben wird. Dies zeigt sich an der monatlichen Arbeitszahl, die zum einen der Abwassertemperatur folgt, siehe Abbildung 21 und während der Heizperiode von Oktober bis April immer höher ist als in den Sommermonaten. Die gemessene Jahresarbeitszahl für das Jahr 2012 beträgt 4,0 und entspricht damit dem im Energiekonzept prognostizierten Wert.



**Abbildung 21: Messwerte der Jahresarbeitszahl und der monatlichen Arbeitszahlen der Wärmepumpe und der Abwasser- und Außentemperatur**

## 7.2 Abwasser-Wärmetauscher

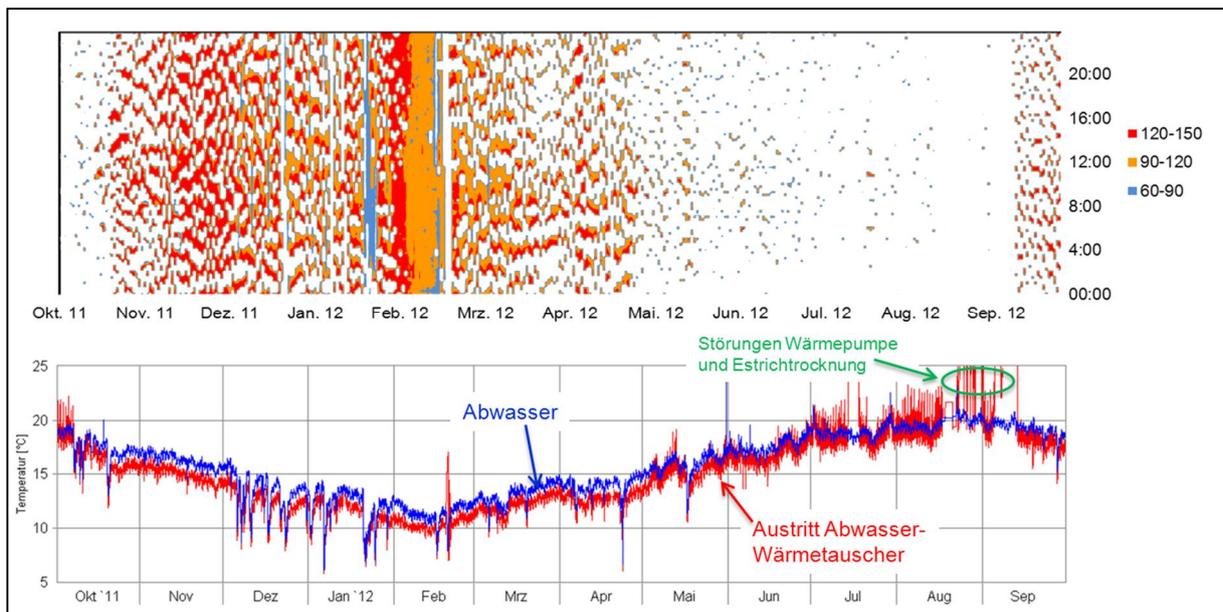


**Abbildung 22: Kennfeld Abwasser-Wärmetauscher (Angaben des Herstellers Fa. Uhrig)**

Für den Abwasser-Wärmetauscher wurde ebenfalls ein Kennfeld im Leistungsverzeichnis gefordert. In Abbildung 22 ist die thermische Entzugsleistung laut Herstellerangaben über

der Austrittstemperatur des Wärmetauschers für unterschiedliche Abwassertemperaturen aufgetragen.

Die ersten Messungen im Betrieb haben die Leistung des Wärmetauschers entsprechend den Vorgaben im Leistungsverzeichnis bestätigt. Bei Berücksichtigung der Messgenauigkeit der Temperaturfühler im Kanal und des Wärmemengenzählers im Verdampferkreis der Wärmepumpe liegen die Messpunkte im Kennfeld.



**Abbildung 23: Messwerte (15 Minutenwerte) der Leistung Abwasser-Wärmetauscher und der Abwassertemperatur**

Die Abbildung 23 zeigt jeweils die Messwerte der Wärmeleistung des Abwasser-Wärmetauschers (oben), der Abwassertemperatur und der Austrittstemperatur aus dem Wärmetauscher (unten) im Zeitraum Oktober 2011 bis September 2012. Anfang Februar 2012 sinkt die Abwassertemperatur auf den Auslegungswert von 12 °C. In diesem Zeitraum werden Leistungen von ca. 120 kW gemessen. Die gemessene Grädigkeit im Wärmetauscher (Differenz zwischen Abwassertemperatur und Austrittstemperatur Abwasser-Wärmetauscher) beträgt ca. 1 K. Das heißt der Abwasser-Wärmetauscher erfüllt die Anforderungen bzgl. thermischer Leistung und Grädigkeit. Einzelne Messungen haben die Kennwerte laut Kennfeld Abwasser-Wärmetauscher zusätzlich bestätigt.

Die Leistung des Abwasser-Wärmetauschers wird von der Verdampferleistung der Wärmepumpe vorgegeben. Diese ist von zwei Faktoren abhängig: Zum einen von der Abwassertemperatur und zum anderen von der Heizungsvorlauftemperatur der Wärmepumpe. Bei niedrigen Vorlauftemperaturen in der Heizperiode ist die Verdampferleistung der Wärmepumpe und damit auch die Leistung Abwasser Wärmetauscher höher, siehe Abbildung 23.

Im Sommer ist die Betriebszeit der Wärmepumpe sehr gering, siehe Abbildung 23. Die Wärmepumpe ist bei geringer Abnahme im Sommer nur etwa 10 bis 15 Minuten in Betrieb um den Speicher aufzuheizen. Das heißt nicht jeder Ladevorgang ist in den 15 Minuten („Momentan“-)werten enthalten und in Abbildung 23 eingezeichnet. Zum Teil sind Ein- oder Ausschaltvorgänge mit deutlich geringerer Leistung enthalten.

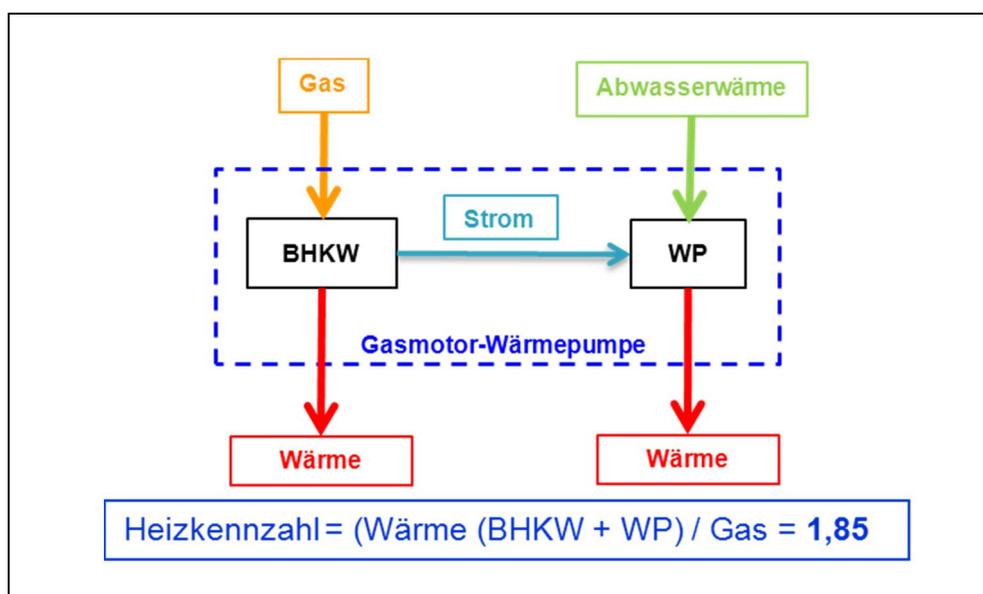
Die Abwassertemperaturen in Abbildung 23 schwanken zwischen 11 °C und 20 °C. Kurzfristig sind Einbrüche mit minimalen Abwassertemperaturen von 6,5 °C festzustellen. Dies sind Tage mit z.B. Schneeschmelze oder Niederschlag. Nach Schneefall im November 2011 folgten Ende November und Anfang Dezember 2011 Tage mit Außentemperaturen über 10 °C, d.h. mit starker Schneeschmelze. An diesen Tagen hat das Oberflächenwasser aus der Schneeschmelze das Abwasser im Kanal deutlich unter 10 °C abgekühlt. Im Januar und Februar 2012 ist dieser Effekt mehrmals kurzzeitig aufgetreten. Im Mittel liegt die Abwassertemperatur im Winter bei ca. 12 °C. In der Übergangszeit steigen die Abwassertemperaturen zum Teil schon über 15 °C. Die Messungen bestätigen die erwarteten Systemtemperaturen im Betrieb der Abwasserwärmenutzung. Für die Auslegung wurden die richtigen Werte verwendet.

Der Jahrgang der Abwassertemperatur im Vergleich zur Außentemperatur ist in Abbildung 21 dargestellt. Die Abwassertemperatur folgt im Wesentlichen der Außentemperatur nur mit jeweils geringeren Extremwerten.

Die Begehung des Kanalabschnitts mit dem eingebauten Wärmetauscher durch den Kanalbetreiber, die Stadtentwässerung Stuttgart (SES), ergab keinerlei Beanstandungen.

### 7.3 Heizkennzahl der Kombination BHKW – Wärmepumpe / „Gasmotor-Wärmepumpe“

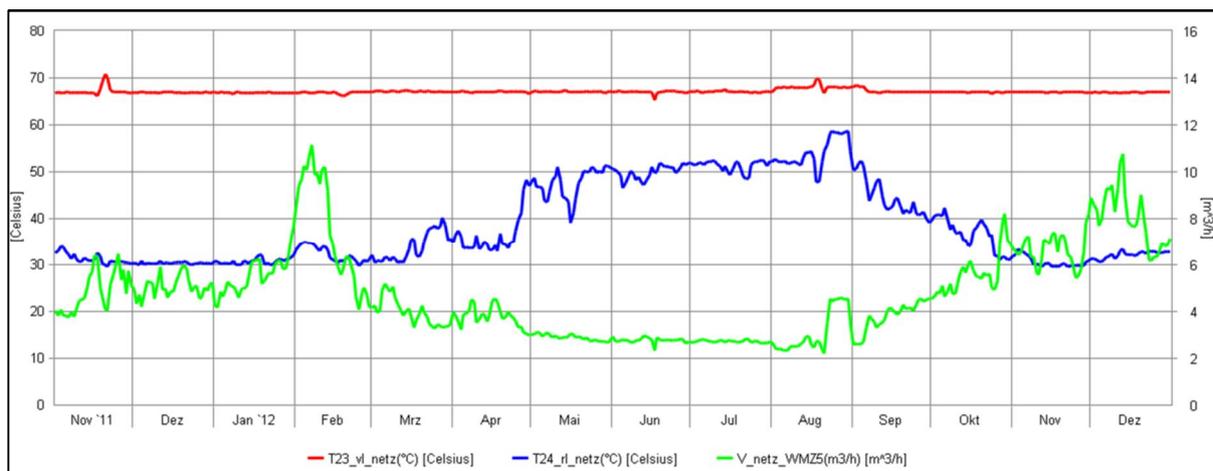
Die Kombination Gas-BHKW und Elektro-Wärmepumpe kann als Gasmotor-Wärmepumpe betrachtet werden, siehe Abbildung 24. Als Antrieb wird Gas eingesetzt, erzeugt wird Wärme. Zusätzlich wird eine Wärmequelle benötigt. Bei der Anlage im Terrot-Areal wird Gas als Antrieb und die erneuerbare Wärmequelle Abwasserwärme eingesetzt. Die Heizkennzahl gibt an, wie viel Wärme mit dem eingesetzten Gas erzeugt werden kann. Für die Anlage im Terrot-Areal ergibt sich im Betriebsjahr 2012 eine Heizkennzahl von 1,85, das heißt mit 1 kWh Gas können 1,85 kWh Wärme erzeugt werden.



**Abbildung 24: Kombination Gas-BHKW und Elektro-Wärmepumpe („Gasmotor-Wärmepumpe“), Berechnung der Heizkennzahl.**

Der gemessene Wirkungsgrad des Gas-BHKW beträgt 95 %. Dabei ist die Stromproduktion und die Wärmeeinspeisung in den Pufferspeicher berücksichtigt. Mit dem zweiten Abgas-Wärmetauscher AWT2, siehe Hydraulikschema in Abbildung 4, wird das Abgas aus dem BHKW weiter abgekühlt. Die Abgastemperatur liegt zum Teil unter 25 °C und damit unter der Umgebungstemperatur. Die Wärme wird zur Anhebung der Eintrittstemperatur in den Verdampfer der Wärmepumpe genutzt und verbessert die Arbeitszahl der Wärmepumpe. Berücksichtigt man die zusätzliche Wärme, dann steigt der Wirkungsgrad des BHKW je nach Betriebszustand auf 102 % bis maximal 105 %.

## 7.4 Hydraulik Nahwärmeverteilnetz und Wärmeübergabestationen



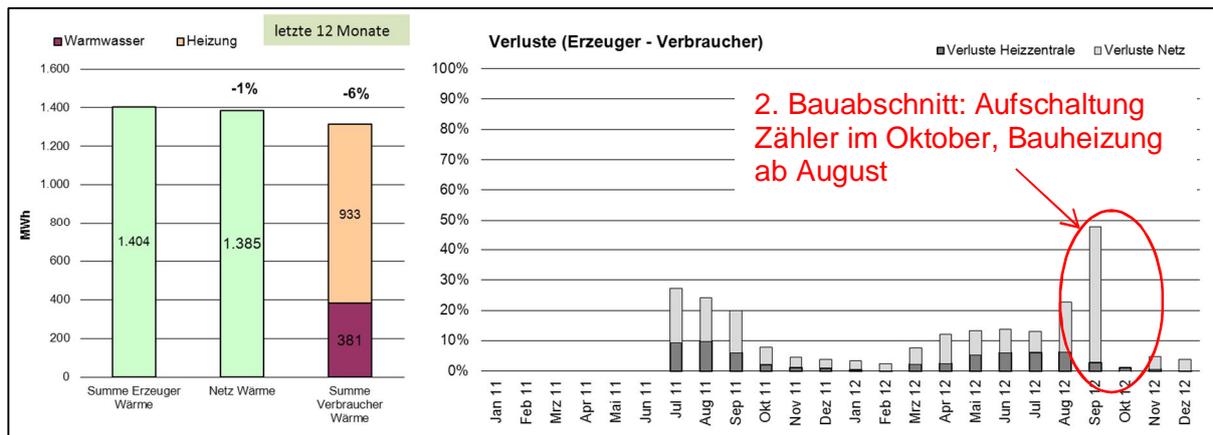
**Abbildung 25: Messwerte Vor- und Rücklauftemperaturen und Durchfluss im Wärmeverteilnetz**

Die Abbildung 25 zeigt die Messwerte von Temperaturen und Durchfluss im Nahwärmenetz. Die Messwerte zeigen, dass die Hydraulik wie geplant funktioniert. Während der Heizperiode von Oktober bis April liegt die Netzurücklauftemperatur immer unter 35 °C bzw. die meiste Zeit bei ca. 31 °C. Hier zeigt sich der Vorteil der Rücklaufauskühlung der Warmwasserbereitung mit der Fußbodenheizung.

Die niedrigen Temperaturen haben den Vorteil, dass die Wärmepumpe mit niedrigen Vorlauf-temperaturen und damit mit einer guten Jahresarbeitszahl von 4 betrieben werden kann, siehe Abbildung 21.

Die niedrigen Betriebstemperaturen im Netz reduzieren deutlich die Wärmeverluste der Anlage. Abbildung 26 zeigt die gemessenen Verluste in der Heizzentrale und im Netz. Auf die Wärmeeinspeisung der Wärmeerzeuger bezogen geht in der Heizzentrale ca. 1 % der Wärme verloren. Dies sind hauptsächlich die Verluste der Pufferspeicher. Im Netz kommen noch 5 % Verluste dazu. Das heißt die Gesamtverluste bezogen auf die Einspeisung der Wärmeerzeuger betragen nur 6 %! Dies ist für eine Nahwärmeversorgung ein sehr 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 eine Verdoppelung der Verluste!

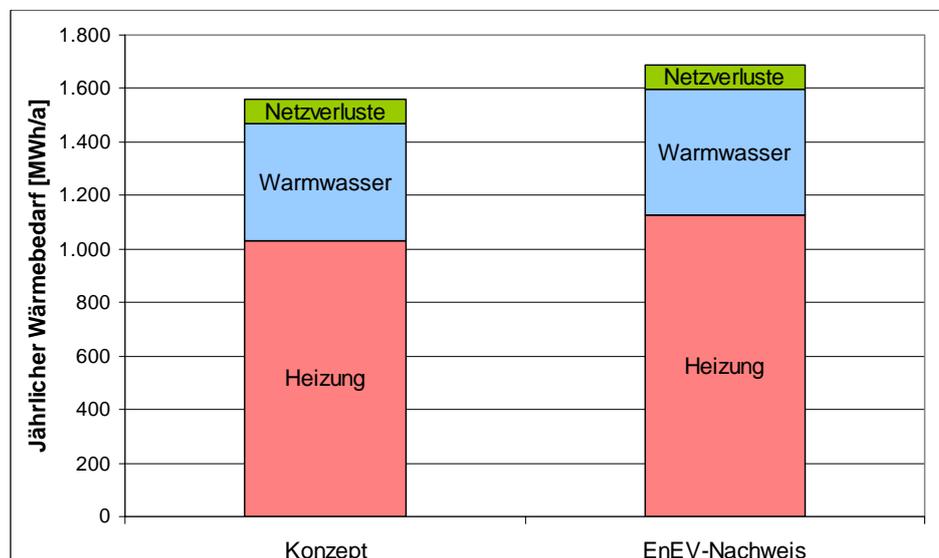


**Abbildung 26: Messwerte der Verluste in der Heizzentrale und im Wärmeverteilnetz**  
Bezug: Eingespeiste Wärmemenge Erzeuger

Die gemessenen Verluste wurden zusätzlich noch durch den Vergleich mit den im Energiekonzept berechneten Werten überprüft. Die im Energiekonzept berechneten Werte liegen in der gleichen Größenordnung wie die gemessenen Werte. Die anteiligen Verluste werden zukünftig noch etwas geringer, wenn der zweite Bauabschnitt voll bezogen sein wird.

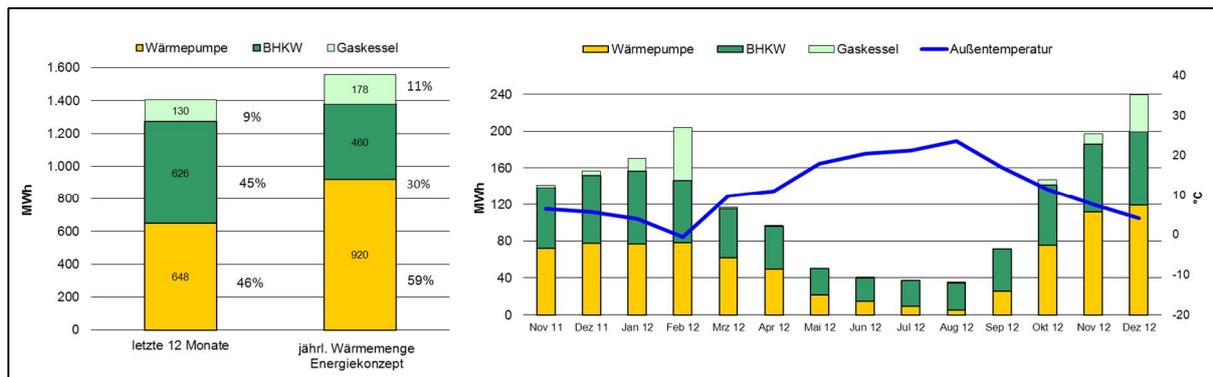
Im Sommer steigen die Verluste auf maximal 15 %. Die Verluste im Sommer 2011 waren bedingt durch höhere Netztemperaturen in der Einregulierungsphase und durch zum Teil noch nicht vollständig bezogene Gebäude deutlich höher als im Sommer 2012.

## 7.5 Wärmebilanz



**Abbildung 27: Berechneter jährlicher Wärmebedarf laut Energiekonzept und entsprechend EnEV-Nachweisen**

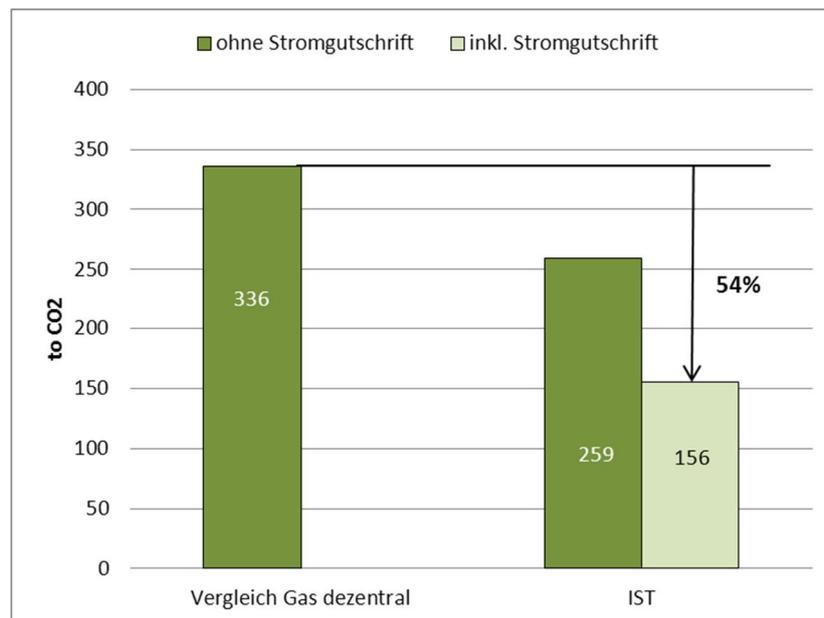
Die Abbildung 27 zeigt den berechneten jährlichen Wärmebedarf aus dem Energiekonzept und aus den EnEV-(Energie-Einspar-Verordnung) Nachweisen für die Gebäude. Die ausgeführten Gebäude brauchen laut EnEV-Nachweise etwa 130 MWh/a bzw. 9 % mehr Wärme als bei der Erstellung des Energiekonzeptes angenommen.



**Abbildung 28: Anteile der Wärmeerzeuger an der Wärmeversorgung**

Die Abbildung 28 zeigt die gemessenen Deckungsanteile der Wärmeerzeuger an der Wärmeversorgung seit November 2011 und im Betriebsjahr 2012. Der Deckungsanteil der Kombination Wärmepumpe - BHKW beträgt 2012 ca. 91 %. Der Gaskessel hat einen Anteil von etwa 9 %. Diese Anteile entsprechen etwa den auf Basis des Wärmebedarfes der EnEV-Nachweise berechneten Werte. Der Anteil der Wärmepumpe ist etwas geringer als im Energiekonzept. Grund dafür ist die etwas kleinere Wärmepumpe, siehe Abschnitt 3.1 und die Ausfallzeiten aufgrund von Störungen der Wärmepumpe. Dies wird durch den größeren Anteil der vom BHKW gelieferten Wärme kompensiert. Das BHKW war 2012 ca. 6.700 Stunden in Betrieb.

## 7.6 CO<sub>2</sub> - Emissionen



**Abbildung 29: CO<sub>2</sub> – Emissionen für das Betriebsjahr 2012 aus den Messungen**

Im Energiekonzept wurde die Reduzierung der CO<sub>2</sub> – Emissionen im Vergleich zu Gaseinzelheizungen mit 41 % berechnet, siehe Abbildung 2. Aus den Messungen ergibt sich eine deutlich höhere Reduzierung von ca. 54 %. Dies liegt an der wesentlich größeren Stromerzeugung mit dem BHKW, siehe Abbildung 30. Das BHKW produziert fast doppelt so viel

Strom als die Wärmepumpe verbraucht. Der Stromüberschuss wird zum Teil in der Heizentrale z.B. für die Pumpen verwendet, der größere Teil wird ins Stromnetz eingespeist. Basis sind die aktuell gültigen Kennwerte für die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Gemis 4.7 2011 (Kennzahl für Stromverdrängungsmix berücksichtigt).

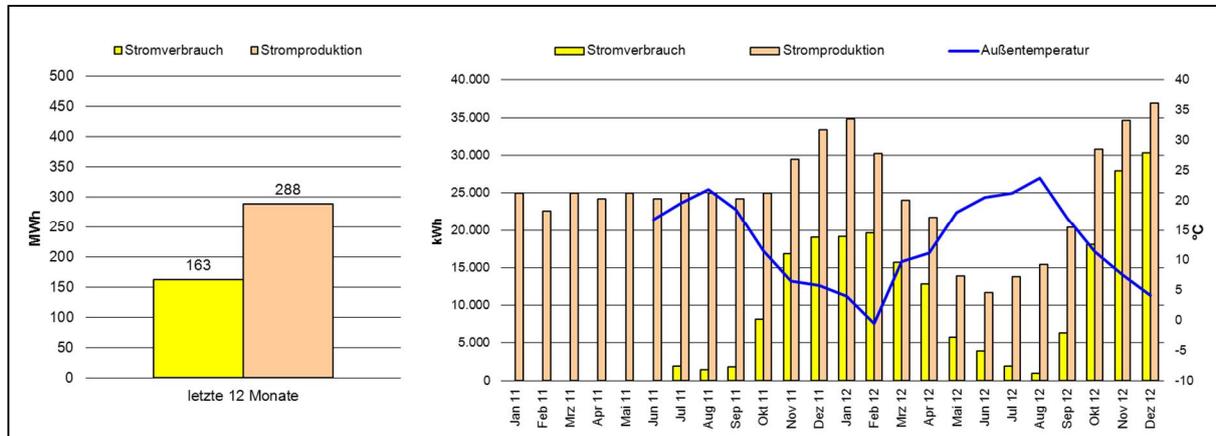


Abbildung 30: Messwerte Stromverbrauch der Wärmepumpe und Stromproduktion BHKW

## 8 Betriebsoptimierung

Wie in Abschnitt 7.5 Wärmebilanz beschreiben, ist der Anteil der Wärmepumpe an der Wärmeerzeugung geringer, als im Energiekonzept. Die Abbildung 31 zeigt die Auslastung der Wärmeerzeuger. Die Auslastung der Wärmepumpe lag im November und Dezember 2011 bei ca. 70 %. 2012 war die Wärmepumpe in diesen Monaten jeweils zu 100 % ausgelastet. Dies ist zum einen auf den höheren Wärmebedarf durch den Anschluss des zweiten Bauabschnitts zurückzuführen.

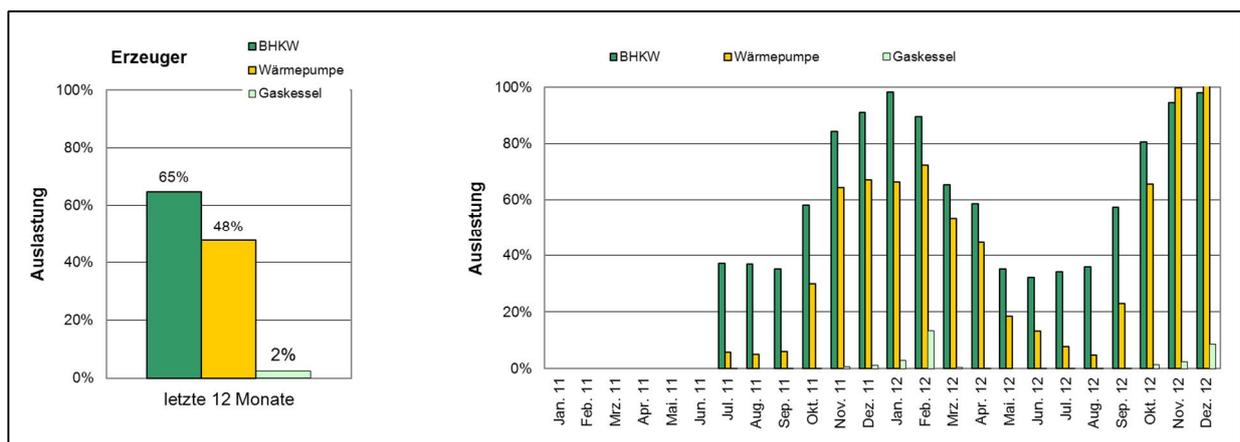
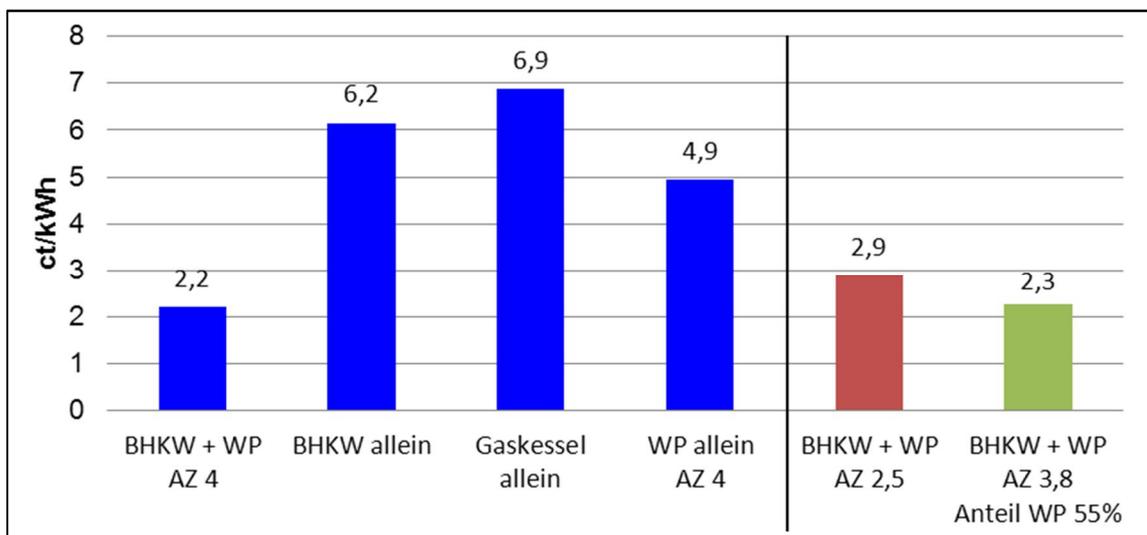


Abbildung 31: Auslastung der Wärmeerzeuger

Zusätzlich wurde im November 2012, um den Anteil der Wärmepumpe weiter zu steigern, der Sollwert für die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe im Sommer- und im Heizbetrieb um jeweils 3 K auf 55 °C und 60 °C angehoben. Die Auswirkungen sind in der Abbildung 28 zu sehen. Die Anteile Wärmepumpe und BHKW im November und Dezember 2012 haben sich

im Vergleich zum Vorjahr verändert. Während der Anteil der Wärmepumpe deutlich gestiegen ist, ist der Anteil BHKW etwas zurückgegangen.

Im Sommerbetrieb ist der Anteil der Wärmepumpe sehr gering, siehe Abbildung 28. Dies ist auf die hohen Netzzücklauftemperaturen im Sommer und damit im reinen Warmwasserbetrieb zurückzuführen. Im August 2012 waren die Netzzücklauftemperaturen noch zusätzlich durch den Anschluss des zweiten Bauabschnitts (Bypässe offen, Estrichaufheizung) erhöht. Zur weiteren Steigerung des Wärmepumpenanteils wurde die Hydraulik der Wärmeübergabestationen im Bereich der Warmwasserbereitung noch verbessert. Netzseitig wurden Kombiventile eingebaut um den Durchfluss begrenzen zu können. Im Ladebetrieb Warmwasserspeicher werden dadurch die Rücklauftemperaturen im Netz weiter reduziert. Sekundärseitig wurden beim Speicherladevorgang Bypass Strömungen über die Zirkulationsleitung festgestellt, welche zu einer Erhöhung der Netzzücklauftemperaturen führte. Der Mangel konnte durch den Umbau der Stationen behoben werden. Die Umbauten wurden erst im November 2012 abgeschlossen, sodass die Auswirkungen erst im Sommer 2013 messbar sind.



**Abbildung 32: Wärmeerzeugungskosten der unterschiedlichen Wärmeerzeuger**

#### Die

Abbildung 32 zeigt die Kosten für die Wärmeerzeugung mit der Kombination Wärmepumpe und BHKW, mit dem BHKW, mit dem Gaskessel und mit der Wärmepumpe jeweils mit den aus den Messungen bestimmten Wirkungsgraden. Diese sind:

- Arbeitszahl Wärmepumpe 4,0
- Wirkungsgrad BHKW 95 %
- Wirkungsgrad Gaskessel 93 %.
- Heizkennzahl der Kombination Wärmepumpe + BHKW 1,85

Die Kosten enthalten die Energie- und die Wartungskosten. Kapitalkosten sind nicht berücksichtigt. Als Energiekosten wurden die aktuellen Bezugskosten des Betreibers ImmoTherm eingesetzt. Bei der Wärmepumpe wurde kein Sondertarif für Heizstrom berücksichtigt. Bei ausschließlich BHKW-Betrieb wird der erzeugte Strom ins Netz eingespeist (keine Eigenstromnutzung).

Die Wärmeerzeugung mit den geringsten Kosten ist die Kombination Wärmepumpe und BHKW gefolgt vom Einzelbetrieb Wärmepumpe und Einzelbetrieb BHKW. Die Wärmeerzeugung

gung mit dem Gaskessel ist die teuerste. Berücksichtigt man den aktuellen Heizstromtarif des Versorgers, so reduzieren sich die Kosten für die Wärmepumpe geringfügig auf 4,3 Cent/kWh. Zur Nutzung des Heizstromtarifes, ist ein separater Zähler für die Wärmepumpe erforderlich.

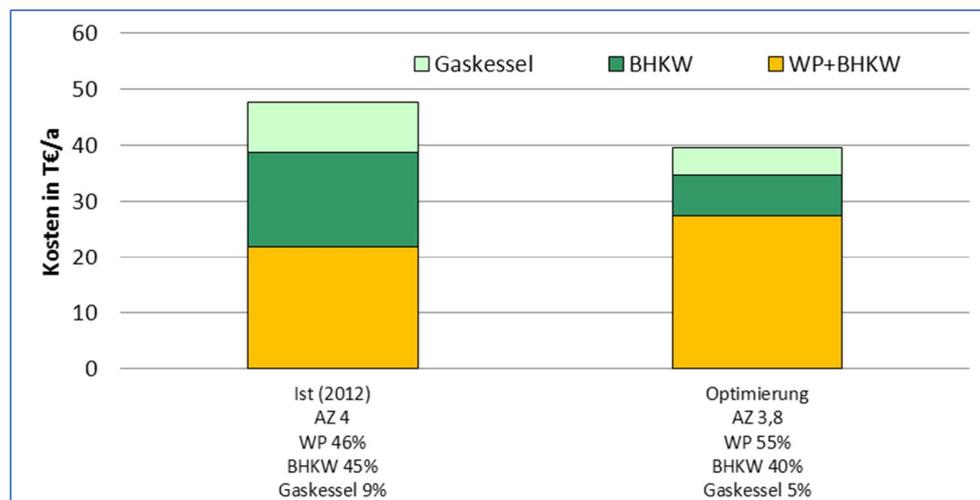
Die bisher eingestellte Betriebsweise „Parallelbetrieb von Wärmepumpe und BHKW in der Grundlast, Deckung Mittellast mit dem BHKW und Deckung Spitzenlast mit dem Gaskessel“ hat sich als die günstigste Lösung erwiesen. Begründung:

- Die Deckung der Grundlast mit der Kombination Wärmepumpe + BHKW im Parallelbetrieb (das heißt Betrieb Wärmepumpe nur bei gleichzeitigem BHKW-Betrieb) ist aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen sinnvoll. Die Wärmeerzeugungskosten und die CO<sub>2</sub>-Emissionen sind minimal.
- Zur Deckung der Mittellast sollte das BHKW genutzt werden. Die Wärmepumpe muss zur Deckung der Mittellast mit höheren Temperaturen und damit schlechter Arbeitszahl von unter 3,0 betrieben werden. Die Wärmeerzeugungskosten liegen damit zwar etwas unter denen beim BHKW Betrieb, jedoch ist aufgrund der Stromproduktion der Betrieb des BHKW ökologisch sinnvoller.
- Für die Deckung der Spitzenlast muss der Gaskessel genutzt werden, da die Leistung der Kombination Wärmepumpe + BHKW nicht ausreicht

Ziel muss daher sein, den Anteil der Wärmeerzeugung mit der Kombination Wärmepumpe + BHKW im Parallelbetrieb zu maximieren. Betrachtet man den Betrieb im Winter 2011 / 2012, so kann die Laufzeit von Wärmepumpe und BHKW noch gesteigert werden. Der Anschluss vom zweiten Bauabschnitt und dem damit verbundenen höheren Wärmebedarf und die Anhebung der Sollwerte der Wärmepumpe im November 2012 haben dazu geführt, dass sowohl Wärmepumpe als auch das BHKW im November und Dezember 2012 zu 100 % ausgelastet waren, siehe Abbildung 31.

Mit der Erhöhung der Solltemperaturen sinkt die Arbeitszahl der Wärmepumpe, das heißt die Wärmepumpe verbraucht je erzeugte kWh Wärme mehr Strom. In der Abbildung 32 rechts sind die Wärmeerzeugungskosten für die Kombination Wärmepumpe + BHKW im Parallelbetrieb mit den im November 2012 eingestellten Sollwerten, siehe Abschnitt 7.5, (grüner Balken) und als Extremwert für die Arbeitszahl 2,5 (roter Balken) angegeben. Die Erzeugungskosten steigen jeweils nur geringfügig.

Für den Betrieb mit den angehobenen Sollwerten der Wärmepumpe wurden die Anteile Wärmepumpe und BHKW mit ca. 55 % und ca. 40 % abgeschätzt (Basis Wärmebedarf 2012, störungsfreier Betrieb der Wärmepumpe vorausgesetzt). Der Anteil vom Gaskessel sinkt auf ca. 5 %. Die Arbeitszahl der Wärmepumpe beträgt nur noch 3,8, die Heizkennzahl der Kombination Wärmepumpe + BHKW nur noch 1,8.



**Abbildung 33: Jährliche Wärmeerzeugungskosten Ist-Zustand und Optimierung**

Die Abbildung 33 zeigt den Vergleich der jährlichen Wärmeerzeugungskosten (Wartung und Energie) für die Betriebsergebnisse 2012 („Ist“) und den Betrieb mit angehobenen Sollwerten („Optimierung“). Basis ist wieder der gemessene Bedarf 2012. Die jährlichen Erzeugungskosten können um ca. 15 % reduziert werden. Voraussetzung ist ein störungsfreier Betrieb der Wärmepumpe. Die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zu Gaseinzelheizungen sinkt mit der wirtschaftlichen Optimierung von 54 % auf ca. 46 % und liegt damit noch deutlich über dem im Energiekonzept genannten Wert. Basis sind wieder die aktuell gültigen Kennwerte für die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Gemis 4.7 2011 (Kennzahl für Stromverdrängungsmix berücksichtigt). Fazit: Die Erhöhung (Maximierung) des Anteils von Wärmepumpe und BHKW verbessert die Wirtschaftlichkeit deutlich. Die Ökologie ist immer noch besser als im Energiekonzept angegeben.

## 9 Zusammenfassung und Empfehlungen

Die Realisierung der Anlage zur Wärmeversorgung im Projekt Terrot-Areal ist abgeschlossen. Abgesehen von Störungen im ersten Betriebsjahr läuft die Anlage zwischenzeitlich nahezu störungsfrei.

In Abwasserkanälen mit großen Wassermengen wie beim Terrot-Areal können mit eingebauten Wärmetauschern große Wärmemengen mit hohen Vorlauftemperaturen problemlos entzogen werden. Gleichzeitig ist der Einbau der Wärmetauscher infolge der großen Wassermenge erschwert und erfordert ein spezielles Konzept. Eine Wasserhaltung genügt nicht, um den Kanal trocken zu legen. Zusätzliche Maßnahmen z.B. die Nutzung von Rückhaltebecken und der Einbau bei Nacht, wie im Projekt Terrot-Areal geschehen, sind notwendig.

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 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 CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Integration einer elektrischen Wärmepumpe in die Nahwärmeversorgung liegt unter optimalen Betriebsbedingungen bei 15 bis 20 %. Durch die Kombination elektrische Wärmepumpe und Gas-Blockheizkraftwerk sind über 40 % Reduzierung erreichbar. Der Einsatz von Abgas-Wärmetauschern für das Gas-Blockheizkraftwerk ist wirtschaftlich und führt zu einer Ausnutzung des Brennstoffes Gas von maximal 105 %.

Die abgerechneten Kosten liegen mit 3 % etwas über der Kostenschätzung aus dem Jahr 2008.

Die Überprüfung der Leistungsfähigkeit von Abwasser-Wärmetauscher und Wärmepumpe ist zu empfehlen. Dazu ist im Leistungsbeschreibung jeweils ein Kennfeld dieser Komponenten einzufordern. Einzelne Betriebspunkte sind nicht ausreichend, da diese im Betrieb nicht exakt überprüft werden können.

Der Abwasser-Wärmetauscher funktioniert wie geplant. Der Wärmetauscher erreicht im Betrieb die Leistung laut Ausschreibung bzw. Kennfeld. Die Abwasserwärmenutzung und der Kanalbetrieb sind seit Einbau bzw. Inbetriebnahme ohne Störungen.

Nach häufigen Störungen im ersten Betriebsjahr läuft die Wärmepumpe mittlerweile nahezu störungsfrei. Nach Nachbesserung durch den Hersteller erreicht die Wärmepumpe die in der Leistungsbeschreibung geforderte Leistung.

Die optimierte Hydraulik der Wärmeverteilung (Nahwärmenetz) funktioniert sehr gut. Im Betrieb werden niedrige Systemtemperaturen insbesondere niedrige Rücklauftemperaturen erreicht. Die Folge sind neben guten Arbeitszahlen der Wärmepumpe extrem niedrige Verluste in der Anlage und eine hohe CO<sub>2</sub>-Reduzierung im Vergleich zu dezentralen Einzelheizungen. Weitere bereits umgesetzte Optimierungsmaßnahmen im Bereich der Wärmeübergabestationen werden zukünftig den Sommerbetrieb weiter verbessern.

Mit Bezug auf den Wärmebedarf 2012 zum Teil ohne den zweiten Bauabschnitt werden mit der ausgeführten Anlage die Vorgaben im Energiekonzept bzgl. Arbeitszahlen Wärmepumpe und CO<sub>2</sub>-Emissionen erreicht bzw. unterschritten.

Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist der Anteil der Kombination Wärmepumpe und BHKW zu maximieren. Dies wurde / wird zukünftig durch die Anpassung der Sollwerte für die Wärmepumpe erreicht. Die damit verbundene Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist tolerierbar. Die Emissionen werden immer noch mehr als 40 % im Vergleich zu Gas-Einzelheizungen reduziert.

Die Wärmeversorgung mit Elektrischer Wärmepumpe, Abwasser-Wärmenutzung, Gas-Blockheizkraft und Gas-Spitzenkessel ist ein gutes Konzept für innerstädtische Wohnquartiere mit hohem Einsparpotential bzgl. CO<sub>2</sub>-Emissionen und Primärenergieeinsatz. Die sorgfältige und detaillierte Planung vorausgesetzt, ist die Umsetzung von ähnlichen Anlagen ohne größere Probleme möglich.

## 10 Veröffentlichungen

Die Anlage, damals im Bau, wurde im Rahmen der Veranstaltung „**Symposium Große Wärmepumpen**“ am 04.02.2010 in Stuttgart vorgestellt.

Die Ergebnisse aus dem Projekt wurden / werden bei folgenden Veranstaltungen der Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) vorgestellt:

DWA-Workshop „**Wärmegewinnung aus Abwasser**“ am 15. November 2012 in Stuttgart

und

DWA-Seminar „**Heizenergie aus Abwasser**“ am 18. und 19.02.2013 in Hamburg

Die Messergebnisse der Anlage sind online auf der Homepage von EGS-plan abrufbar. Zur kompakten Information über das Projekt steht ein Flyer auf der Homepage von EGS-plan zum Download bereit. Der Abschlussbericht kann von EGS-plan bezogen werden.

Der Betreiber ImmoTherm GmbH wird die Ergebnisse aus dem Projekt auf dessen Homepage veröffentlichen.

## 11 Literaturverzeichnis

/Ryser 08/ Ryser Ing., Bern: *Vergabevorschlag mit Detailangebot für die Nutzung der Abwasserwärme im Projekt Terrot-Areal in Stuttgart-Bad Cannstatt, Bern 2008, Bericht*