

Landeshauptstadt Stuttgart

Eigenbetrieb Stadtentwässerung

Potentialstudie zur Abwasserwärmenutzung (Stufe 2b – mit hydraulischer Auslastung)

Bericht

Stand: 28.03.2018

Projekt-Nr. TS-03964

Fertigung 1

ZUSAMMENFASSUNG

Im Auftrag des Eigenbetriebs Stadtentwässerung der Landeshauptstadt Stuttgart wurde eine Potentialstudie zur Abwasserwärmenutzung erstellt, deren zweite Stufe (2b) hiermit vorliegt.

Änderung dieser Teilstufe gegenüber der vorherigen (2a) ist die Auswertung von hydraulischen Daten für die noch fehlenden Einzugsgebiete. Somit liegt nun in dieser Fassung die komplette Bewertung nach hydraulischen Gesichtspunkten vor. Eine weitere Änderung zur vorherigen Stufe ist die Novellierung der Einstiegsbedingungen in Schächte. Es darf nun, nach Neufassung des DWA-Merkblattes M114, nur noch in einen Kanal mit Durchmesser größer gleich DN1000 eingestiegen werden. Dadurch ändert sich auch die Kategorie der Nutzbarkeit von Haltungen, bei denen schon eine hydraulische Bewertung vorlag.

Bezogen auf die Länge des Gesamtnetzes von 1.683,53 km kommen 7 % (110,96 km) der Haltungen für eine Abwasserwärmenutzung in Frage. 4 % (72 km) sind ohne Einschränkungen nutzbar (d. h. größer gleich DN1000 sowie ausreichende hydraulische Leitfähigkeit).



INHALTSVERZEICHNIS

Zusammenfassung	2
Inhaltsverzeichnis	3
1 Berichtsgrundlage	4
2 Klassifizierung der hydraulischen Auslastung	5
2.1.1 Vorliegende Daten	5
2.1.2 Vorgehensweise	5
3 Statistische Auswertung	6
Unterlagenverzeichnis	8

1 BERICHTSGRUNDLAGE

Die im August 2013 vorgelegte Stufe 2a der Potentialstudie für das Stuttgarter Kanalnetz stellt die Vorarbeit für die vorgelegte Stufe 2b dar.

In dieser Stufe wurden die Gebiete, die in der Stufe 2a für die hydraulische Auslastung noch nicht betrachtet wurden, mit den nun vorhandenen Daten geprüft. Dabei wurden Haltungen, die bei ihrem zugewiesenen Bemessungsregen hydraulische Auslastungsgrade über gewisse Grenzwerte aufweisen als „eingeschränkt nutzbar“ klassifiziert. Hier ist eine Einengung des Querschnittes, wie sie beim nachträglichen Einbau von Wärmetauschern eintritt, nicht zulässig bzw. detailliert zu prüfen.

Außerdem wurden weitere Haltungen (DN800 bis kleiner DN1000) als „eingeschränkt nutzbar“ klassifiziert aufgrund der Neufassung des DWA-Merkblattes M114. Nach diesem darf nur noch in Schächte mit Durchmesser größer gleich DN1000 eingestiegen werden.

Es fallen somit weitere Haltungen aus der Klasse „uneingeschränkt nutzbar“ in die Klasse „eingeschränkt nutzbar“.

2 KLASSIFIZIERUNG DER HYDRAULISCHEN AUSLASTUNG

2.1.1 Vorliegende Daten

Für die nach der Bearbeitung der Stufe 2a noch nicht betrachteten Gebietsteile wurden seitens des AG Auszüge aus den hydraulischen Kanalnetzberechnungen zur Verfügung gestellt. Diese beinhalten die Netzdatei (.net) sowie die Ergebnisdaten der hydraulischen Berechnungen für alle relevanten Bemessungsregen (.ey). Für die Einteilung der Nutzungsklassen stand der Flächennutzungsplan der Stadt Stuttgart zur Verfügung.

Die folgenden Gebiete wurden in dieser Stufe betrachtet:

- Aldinger Straße
- Voltastraße
- Feuerbach T1
- Feuerbach T2
- Neckar rechts T2
- Neckar rechts T3
- Nesenbach
- Sindelbach
- Wangen

Dies entspricht 54 % des gesamten Stuttgarter Kanalnetzes. In den Karten dieser Stufe sind somit sämtliche Stadtteile vollwertig abgedeckt.

2.1.2 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise für die hydraulische Auslastung gestaltete sich gleich wie jene aus der Stufe 2a. Hier wird auf die entsprechende Dokumentation verwiesen.

Aufgrund einer Änderung im Regelwerk der DWA (Neufassung des Merkblattes M114, Gelbdruck wird spätestens zum Frühjahr diesen Jahres erwartet) wurden zudem Haltungen, die kleiner als DN 1000 sind, als „nicht begehbar“ beurteilt und werden deswegen als „eingeschränkt nutzbar“ klassifiziert. Dieses Kriterium wurde auf sämtliche Bereiche des Kanalnetzes angewendet, also auch auf die in der Stufe 2a bereits betrachteten Teile.

3 STATISTISCHE AUSWERTUNG

Von allen Haltungen des Kanalnetzes kommen für eine Abwasserwärmenutzung weiterhin 7 % in Frage. Unter Beachtung der hydraulischen Auslastung der bisher fehlenden Gebiete sind nun 4 % der Haltungen „geeignet ohne Einschränkung“ (Querschnitt größer gleich DN1000, ausreichende hydraulische Leistungsfähigkeit).

Tab. 1 Statistische Auswertung der Ergebnisse der Energiekarten

Länge aller Haltungen der Stadt Stuttgart [km]	Länge aller in Frage kommender Haltungen [km, -]	Länge der Haltungen ohne Einschränkungen [km, -]
1.683,53	110,96 (7 %)	72,00 (4 %)

Klinger und Partner
Ingenieurbüro für Bauwesen und Umwelttechnik GmbH

Friolzheimer Straße 3 • 70499 Stuttgart
Telefon: 0711 693308-0 • Telefax: 0711 693308-99
E-Mail: info@klinger-partner.de
Internet: <http://www.klinger-partner.de>

Aufgestellt:
Kevin Knoche, B. Sc

Stuttgart, den 28.03.2018
TS-03964 köm/jb/kno



Andreas Maier
Geschäftsführer

i. A. 

Jan Butz
Projektleiter

UNTERLAGENVERZEICHNIS

1 Erläuterungsbericht

Potentialstudie zur Abwasserwärmenutzung (Stufe 1 – ohne hydraulische Auslastung der Kanäle, Stufe 2a – mit hydraulischer Auslastung der Kanäle). Landeshauptstadt Stuttgart, Eigenbetrieb Stadtentwässerung. Ingenieurbüro Klinger und Partner GmbH, Stuttgart, Stand 28.08.2011 (Stufe 1), 20.08.2013 (Stufe 2a), Projektnummer ID-01043

LANDESHAUPTSTADT STUTTGART EIGENBETRIEB STADTENTWÄSSERUNG

Potenzialstudie zur Abwasserwärmenutzung (Stufe 2a – mit hydraulischer Auslastung der Kanäle)

Bericht

Stand: 20. 08. 2013

Projekt-Nr. ID-01043

Fertigung 1 von 3

ZUSAMMENFASSUNG

Im Auftrag des Eigenbetriebs Stadtentwässerung der Landeshauptstadt Stuttgart wurde eine Potenzialstudie zur Abwasserwärmenutzung erstellt, deren zweite Stufe hiermit vorgelegt wird.

Kernergebnis der ersten Stufe dieser Studie waren Energiekarten, in denen die folgenden, allgemeinen Grenzkriterien für eine wirtschaftliche Nutzung der Abwasserwärme, die sich aus dem DWA-Merkblatt M 114 „Energie aus Abwasser“ ergeben, aggregiert und grafisch dargestellt wurden:

- ein Mindestabfluss von 15 l/s
- eine Entfernung vom Kanal zum Wärmenutzer von 150 bzw. 300 m.

Weiterhin wurde dargestellt, ob die Haltungen einen Minstdurchmesser von DN 800 haben, da dies die Nutzung der Abwasserwärme auch mit nachträglich in den Kanal eingebrachten Wärmetauschern erlaubt.

Eingetragen in die Energiekarten wurden in der Stufe 1 darüber hinaus diejenigen kommunalen Gebäude, die einen Jahreswärmeverbrauch von mehr als 125.000 kWh/a haben und damit für eine Nutzung von Abwasserwärme heizungsseitig in Frage kommen.

In der nun vorgestellten Stufe 2a ist auch die hydraulische Leistungsfähigkeit der Haltungen bewertet worden, die für die Nutzung mit nachträglich in den Kanal eingebrachten Wärmetauschern ebenfalls bedeutsam ist.

Da noch nicht das gesamte, Stuttgarter Kanalnetz hydraulisch überrechnet wurde, konnte diese Auswertung auch noch nicht für alle Haltungen durchgeführt werden. In einer weiteren Stufe (Stufe 2b) soll dies später nachgeholt werden.

Bezogen auf die Länge des Gesamtnetzes von 1.683,53 km kommen 7 % (110,96 km) der Haltungen für eine Abwasserwärmenutzung in Frage. Der überwiegende Anteil davon (89,59 km) ist ohne Einschränkungen nutzbar (d.h. > DN 800 und mit ausreichender hydraulischer Leistungsfähigkeit).



INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG..... 2

INHALTSVERZEICHNIS 3

1 BERICHTSGRUNDLAGE 4

2 KLASSIFIZIERUNG DER HYDRAULISCHEN AUSLASTUNG..... 5

 2.1.1 Vorliegenden Daten..... 5

 2.1.2 Vorgehensweise 5

3 BESCHREIBUNG DER ERGEBNISSE..... 7

 3.1 Statistische Auswertung 7

ANHANG 9

1 BERICHTSGRUNDLAGE

Die bereits im August 2011 vorgelegte Stufe 1 der Potenzialstudie für das Stuttgarter Kanalnetz ist eine essentielle Vorarbeit für die hier vorgelegte Stufe 2a.

Neben kleineren Korrekturen an ausgewählten Stellen wurde von der Stufe 1 zur Stufe 2a „lediglich“ eine Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Haltungen vorgenommen (soweit die dazu notwendigen Grundlagedaten vorlagen). Haltungen, die bei ihrem zugewiesenen Bemessungsregen hydraulische Auslastungsgrade über gewissen Grenzwerte aufweisen (vgl. dazu Kapitel 2), werden als „eingeschränkt nutzbar“ klassifiziert, da eine weitere Einengung des Querschnitts vermutlich nicht zulässig ist.

Im Wesentlichen fallen somit in der Stufe 2a gegenüber den Ergebnissen der Stufe 1 Haltungen aus der Klasse „uneingeschränkt nutzbar“ in die Klasse „eingeschränkt nutzbar“.

Um die Ergebnismappen der Stufe 2a eigenständig nutzbar zu halten und andererseits versteckte Wiederholungen zu vermeiden, wurde der Erläuterungsbericht der Stufe 1 vollständig in den Anhang dieses Erläuterungsberichts der Stufe 2a aufgenommen.

2 KLASSIFIZIERUNG DER HYDRAULISCHEN AUSLASTUNG

2.1.1 Vorliegenden Daten

Die Ergebnisdaten der hydraulischen Kanalnetzüberrechnungen, die bis zum Stichtag (01. Juli 2013) vorlagen, wurden vom AG zur Verfügung gestellt. Angefragt wurden die Kanalnetzdatei (*.net), die Ergebnisdateien der hydraulischen Berechnung für den Bestand und für alle relevanten Bemessungsregen (*.ey) sowie eine Karte mit der Einteilung der Nutzungsklassen, die für die Zuordnung der Bemessungsregen notwendig ist.

Für die folgenden Gebiete lagen die Ergebnisse vor und wurden übermittelt:

- Hummelgraben
- Seegraben
- Schwarzbach
- RÜB Birkacher Straße
- GKW Ditzingen
- Plieningen
- Neckar rechts T1
- HS West
- EZG Vaihingen/Büsnau
- Neckar links

Die vorliegenden Gebiete entsprechen ca. 46 % des gesamten Stuttgarter Kanalnetzes (bezogen auf die Anzahl an Haltungen).

2.1.2 Vorgehensweise

Für die Teilbereiche des Kanalnetzes, für die die Ergebnisse der hydraulischen Berechnung (AKP) vorlagen, wurde die hydraulische Leistungsfähigkeit als Kriterium in die Energiekarten aufgenommen. Ist der Auslastungsgrad beim Bemessungsregen (dessen jeweilige Widerkehrzeit sich aus der Nutzungsklasse des Gebiets ergibt) größer als der jeweilige Grenzwert, so wird die hydraulische Leistungsfähigkeit als „nicht ausreichend“ bewertet, so dass eine Nutzung nachträglich installierter Wärmetauscher in Frage gestellt ist.

Da die Querschnittsverengung durch nachträgliche Wärmetauscher anteilig umso geringer ist, je größer der Rohrdurchmesser ist, wurde der Grenzwert gestaffelt definiert:

- | | |
|------------------------|----------------------|
| - DN 800: | 85 % Auslastungsgrad |
| - > DN 800 bis DN 1400 | 90 % Auslastungsgrad |
| - > DN 1400 | 95 % Auslastungsgrad |

3 BESCHREIBUNG DER ERGEBNISSE

3.1 Statistische Auswertung

Von allen Haltungen des Kanalnetzes der Stadt Stuttgart kommen 7 % für eine Abwasserwärmenutzung in Frage. Dieser Wert ist bezogen auf die Länge der Haltungen, für die eine Abwasserhaltung grundsätzlich sinnvoll ist: die der Schmutz- und Mischwasserkanäle.

Auch nach Berücksichtigung der hydraulischen Auslastung der Kanäle überwiegt die Klasse „geeignet ohne Einschränkungen“ (Querschnitt größer DN 800, ausreichende hydraulische Leistungsfähigkeit) mit 81 % der relevanten Haltungen die Klasse „geeignet mit Einschränkungen“ bei weitem (Tabelle 1).

Tab. 1: Statistische Auswertung der Ergebnisse der Energiekarten

Länge aller Haltungen der Stadt Stuttgart [km]	Länge aller in Frage kommender Haltungen [km, -]	Länge der Haltungen ohne Einschränkungen [km]
1.683,53	110,96 (7 %)	89,59

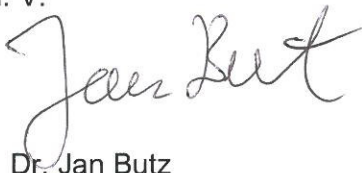
Klinger und Partner
Ingenieurbüro für Bauwesen und Umwelttechnik GmbH

Friolzheimer Straße 3 · 70499 Stuttgart
Telefon: 0711 693308-0 · Telefax: 0711 693308-99
E-Mail: info@klinger-partner.de
Internet: <http://www.klinger-partner.de>

Aufgestellt:
Dr.-Ing. Jan Butz

Stuttgart, den 20.08.2013
ID-01043 sch/jb/jb

i. V.



Dr. Jan Butz
Projektleiter



Thomas Schneider
Geschäftsführer



ANHANG

Erläuterungsbericht

Potenzialstudie zur Abwasserwärmenutzung (Stufe 1 – ohne hydraulische Auslastung der Kanäle). Landeshauptstadt Stuttgart, Eigenbetrieb Stadtentwässerung. Ingenieurbüro Klinger und Partner GmbH, Stuttgart, Stand 24.08.2011

LANDESHAUPTSTADT STUTTGART EIGENBETRIEB STADTENTWÄSSERUNG

Potenzialstudie zur Abwasserwärmenutzung (Stufe 1 – ohne hydraulische Auslastung der Kanäle)

Bericht

Stand: 24. 08. 2011

Projekt-Nr. ID-01043

Fertigung 1 von 3

ZUSAMMENFASSUNG

Im Auftrag des Eigenbetriebs Stadtentwässerung der Landeshauptstadt Stuttgart wurde eine Potenzialstudie zur Abwasserwärmenutzung erstellt.

Kernergebnis der Studie sind die Energiekarten, die diesem Bericht beiliegen. In diesen Energiekarten werden die allgemeinen Grenzkriterien für eine wirtschaftliche Nutzung der Abwasserwärme, die sich aus dem DWA-Merkblatt M 114 „Energie aus Abwasser“ ergeben, aggregiert und grafisch dargestellt. Diese sind:

- ein Mindestabfluss von 15 l/s
- eine Entfernung vom Kanal zum Wärmenutzer von 150 bzw. 300 m.

Weiterhin ist ein wesentliches Kriterium dargestellt, das eine Nutzung der Abwasserwärme auch mit nachträglich in den Kanal eingebrachten Wärmetauschern erlaubt:

- ein Mindestdurchmesser von DN 800.

Eingetragen in die Energiekarten sind darüber hinaus diejenigen kommunalen Gebäude, die einen Jahreswärmeverbrauch von mehr als 125.000 kWh/a haben und damit für eine Nutzung von Abwasserwärme heizungsseitig in Frage kommen.

In der Stufe 2 des Projektes, nach Beendigung der hydraulischen Berechnungen des Kanalnetzes, ist es geplant, die Energiekarten um das Kriterium:

- hydraulische Reserve von mindestens 10 %

zu erweitern.

Bezogen auf die Länge des Gesamtnetzes von 1.683,53 km kommen 7 % (110,96 km) der Haltungen für eine Abwasserwärmenutzung in Frage. Der überwiegende Anteil davon (98,07 km) ist ohne Einschränkungen nutzbar (d.h. > DN 800).

Die Abwassertemperaturen sind geprägt vom jeweiligen Einzugsgebiet und sind dort am höchsten, wo ein hoch verdichtetes Einzugsgebiet mit einer hohen Schmutzwasserabflusspende vorliegt.

Erst anhand von Machbarkeitsstudien zu einzelnen Objekten wird sich erweisen, ob das allgemeine Potenzial zur Abwasserwärmenutzung, das sich aus den Energiekarten ergibt, sich auch im Kanalnetz der Stadt Stuttgart konkret wirtschaftlich und ökologisch vorteilhaft umsetzen lässt.

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG	2
INHALTSVERZEICHNIS	3
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	5
1 EINLEITUNG.....	6
2 PRINZIPIELL MÖGLICHE ORTE DER WÄRMEGEWINNUNG	7
2.1 In der Liegenschaft	7
2.2 Im Kanalnetz	8
2.3 Auf bzw. nach der Kläranlage	8
2.4 Haupt- und Nebenstrom	9
3 FUNKTIONSWEISE EINER ANLAGE ZUR ABWASSERWÄRMENUTZUNG (IM KANALNETZ)	10
3.1 Prinzipieller Aufbau der Anlage.....	10
3.2 Rinnenwärmetauscher.....	11
3.3 Externe Wärmetauscher („Bypass-Lösung“)	14
3.4 Das Prinzip der Wärmepumpe.....	15
3.5 Nutzung zu Kühlungszwecken.....	16
3.6 Effizienzkriterien	17
4 WIRTSCHAFTLICHKEIT, ENERGIE- UND CO₂-BILANZEN, VERTRAGSGESTALTUNG	19
4.1 Wirtschaftlichkeit.....	19
4.2 Energie- und CO ₂ -Bilanzen.....	21
4.3 Ökobilanzen	23
4.4 Hinweise zur Vertragsgestaltung	25
5 BEISPIELE BISHER AUSGEFÜHRTER ANLAGEN	26
5.1 Wärmeentzug innerhalb der Liegenschaft.....	26

5.2	Wärmeentzug in der Kanalisation	26
5.3	Wärmeentzug auf bzw. nach der Kläranlage	27
6	ENERGIEKARTE	29
6.1	In der Energiekarte dargestellte Kriterien.....	29
6.1.1	Mittlerer Trockenwetterabfluss	30
6.1.2	Geometrische Kanaldaten	33
6.1.3	Abstand Wärmenutzer - Kanal	33
6.1.4	Fernwärmenetz EnBW	34
6.1.5	Vorhandene und Potenzielle Wärmenutzer	34
6.2	Erläuterung der Legenden	35
7	BESCHREIBUNG DER ERGEBNISSE.....	36
7.1	Statistische Auswertung	36
7.2	Qualitative Auswertung.....	36
8	AUSWERTUNG DER TEMPERATURDATEN	38
8.1	Auswertung der Einzeldaten der Klärwerke	38
8.2	Vergleich der Ergebnisse mit anderen Kläranlagen	40
8.3	Auswertung der Temperaturmessungen im Kanal	40
	LITERATURVERZEICHNIS.....	45
	ANHANG	47

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1:	Mögliche Einbauorte für Wärmetauscher (aus: /3/)	7
Abb. 2:	Prinzipieller Aufbau der Abwärmenutzung aus Abwasser im Abwasserkanal (Quelle: Wallstein Ingenieur GmbH)	11
Abb. 3:	Nachträglich einsetzbares Wärmetauschermodul	12
Abb. 4:	Nachträglich einsetzbares Wärmetauschermodul im Kanal (RÜB Saarstraße, Bretten)	12
Abb. 5:	Vorgefertigter Wärmetauscher im Betonwerk vor dem Einbringen in die Schalung (aus: /2/)	13
Abb. 6:	Betonrohr mit integriertem Wärmetauscher (aus: /1/)	13
Abb. 7:	Prinzipiskizze des Gesamtsystems eines externen Wärmetauschers (Quelle: Fa. Huber AG, Berching)	14
Abb. 8:	Wärmetauschermodul eines externen Wärmetauschersystems (Quelle: Fa. Huber AG, Berching)	15
Abb. 9:	Vereinfachtes Funktionsschema für eine Wärmepumpe mit umkehrbarer Betriebsweise im Heizbetrieb (links) und im Kühlbetrieb (rechts), modifiziert nach /7/	17
Abb. 10:	Energieflüsse beim Einsatz eines Gas-Brennwert-Kessels im Vergleich zu einer Wärmepumpe mit BHKW (aus: /3/)	22
Abb. 11:	Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger bzw. Wärmequellen	23
Abb. 12:	Bewertung verschiedener Heizvarianten (Methode Eco-indicator (H, A), Bezugsgröße 1 MJ _{Nutz} , aus: /5/)	24
Abb. 13:	Bewertung verschiedener Heizvarianten (Methode ökologische Knappheit 1997, Bezugsgröße 1 MJ _{Nutz} , aus: /5/)	25
Abb. 14:	Überlagerung der geocodierten Wasserverbrauchszahlen (rot) mit den ermittelten Teileinzugsgebieten der Hauptsstränge des Stuttgarter Kanalnetzes (blau), Zulaufgruppe Neckar- Nesenbach (Farbgebung der Teileinzugsgebiete nach Einzugsgebieten der Abflussmessstellen)	31
Abb. 15:	Abwassertemperaturen im Belebungsbecken des Klärwerks Plieningen (Jahre 2004 bis 2009)	38
Abb. 16:	Unterschreitungshäufigkeiten der Abwassertemperaturen im Belebungsbecken der vier Stuttgarter Klärwerke (Bezugszeitraum: Jahre 2004 bis 2009)	39
Abb. 17:	Unterschreitungshäufigkeiten der Abwassertemperaturen auf den Stuttgarter Klärwerken im Vergleich mit anderen Klärwerken aus Baden-Württemberg	40
Abb. 18:	Abflussgewichtete Tagesmittel der Abwassertemperatur an der Messstelle Hofener Straße über der Abwassertemperatur im Belebungsbecken des HKW Mühlhausen und die daraus ermittelte Regressionsgerade	41
Abb. 19:	Regressionsgeraden des abflussgewichteten Tagesmittels der Abwassertemperatur an den fünf Messstellen über der Abwassertemperatur im Belebungsbecken des HKW Mühlhausen	42

1 EINLEITUNG

Die Idee der Abwasserwärmenutzung ist nicht neu: Bereits 1982 wurde im „Salemer Pflegehof“, einer Sozialstätte mit kulturellen Ausstellungsräumen in Esslingen, eine erste, deutsche Pilotanlage errichtet. Das Gesamtprojekt wurde gefördert vom damaligen Bundesforschungsministerium, der Betrieb mehrere Jahre lang wissenschaftlich begleitet.

Durch die laufende Klimaschutzdebatte erscheint das Thema Abwasserwärme seit einiger Zeit wieder verstärkt auf der politische Agenda. Zugleich wird diese Technologie aufgrund steigender Energiepreise einerseits und dem technologischen Fortschritt im Bereich der Wärmepumpen und Wärmetauscher andererseits zunehmend wirtschaftlich interessant.

Trotzdem werden viele mögliche Abwasserenergieanlagen nicht realisiert, weil die Technik bei Planern und Bauherren noch zu wenig bekannt ist; aber auch, weil angesichts immer engerer Terminvorgaben für Bauprojekte die Zeit für die nötigen Vorabklärungen oft nicht vorhanden ist (/4/).

Aus diesem Grund hat die Landeshauptstadt Stuttgart, Tiefbauamt/Eigenbetrieb Stadtentwässerung das Ingenieurbüro Klinger und Partner (Stuttgart) mit der Erarbeitung einer Potenzialstudie beauftragt, mit der die Grundlagenarbeit für die Abwasserwärmenutzung für die Landeshauptstadt Stuttgart geleistet wird.

Ein wesentliches Element einer Potenzialstudie ist das Erstellen der Energiekarte. Mit dieser können geeignete Standorte systematisch gesucht werden. So kann aufgrund der Karte ein Prioritätsgebiet für Wärmenutzung aus Abwasser ausgewiesen werden, das auf geeignete Objekte hin untersucht wird (öffentliche Bauten, größere private Gebäude). Zugleich ermöglicht diese Karte schnelles Handeln, wenn im Prioritätsgebiet

- große öffentliche oder private Bauten neu gebaut werden,
- Sanierungen von Heizungssystemen mit großen Leistungen vorgenommen werden oder
- Abwasserkanäle neu gebaut oder erneuert werden.

2 PRINZIPIELL MÖGLICHE ORTE DER WÄRMEGEWINNUNG

Es gibt grundsätzlich drei verschiedene Orte, an denen Wärmetauscher eingebaut und somit Wärme gewonnen werden kann:

1. In der Liegenschaft (aus Rohabwasser),
2. im Kanalnetz (aus Rohabwasser) oder
3. auf bzw. nach der Kläranlage (aus gereinigtem Abwasser).

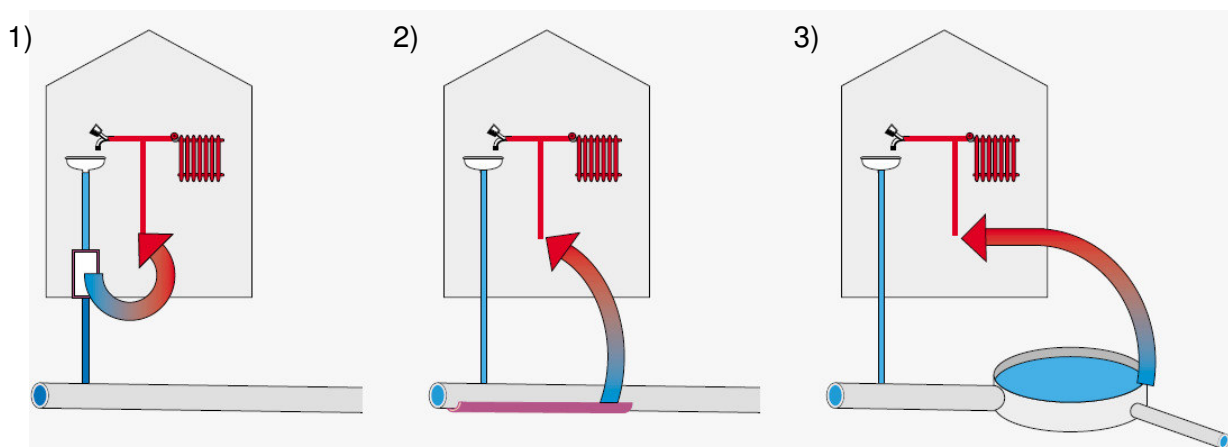


Abb. 1: Mögliche Einbauorte für Wärmetauscher (aus: /3/)

2.1 In der Liegenschaft

Die Abwasserwärmenutzung innerhalb der Liegenschaft ist, in Form der Abwärmenutzung in der Industrie (chemischen Industrie, Lebensmittelindustrie), zurzeit sicherlich am weitesten verbreitet. In aller Regel handelt es sich dabei aber nicht um mit Fäkalien verunreinigtes Abwasser. So nutzt auch das Stuttgarter Mineralbad „Das Leuze“ seit über 25 Jahren erfolgreich die Abwärme des ablaufenden Wassers aus mehreren Becken im Warmbade- und Außenbereich. Seit wenigen Jahren wird zusätzlich die Wärme des Abwassers aus dem Duschbereich genutzt.

Folgende Vorteile hat eine Abwasserwärmenutzung innerhalb der Liegenschaft:

- relativ hohe Abwassertemperaturen
- sehr kurzer Wärmetransportweg
- Betreiber ist gleich dem Wärmeverbraucher
- kein Einfluss von Niederschlagswasser

Den Vorteilen stehen folgende Nachteile gegenüber:

- geringer Abfluss mit tageszeitlich großen Schwankungen
- dezentrale Anlagen mit hohem Betriebsaufwand

Eine Analyse der Vor- und Nachteile zeigt, dass die Nutzung in der Liegenschaft vornehmlich bei gewerblich/industriellen oder sehr speziellen, öffentlichen Bauten zum Tragen kommen kann.

2.2 Im Kanalnetz

Die Abwärmenutzung im Kanalnetz ist diejenige Form, an die zuerst gedacht wird, wenn das Thema Abwasserwärmenutzung angesprochen wird. Sie weist im Allgemeinen auch das größte Potenzial auf, da sich die meisten größeren Bauten inmitten von Siedlungsgebieten befinden, die von einem dichten Kanalisationsnetz durchzogen sind.

Einer Abwasserwärmenutzung im Kanalnetz können folgende Vorteile zugeschrieben werden:

- größere Abwassermengen und damit größerer Energieinhalt
- kurzer Wärmetransportweg
- Überwachung und Betriebssicherheit angemessen

Im Gegenzug dazu sind die folgenden Nachteile zu benennen:

- Abhängigkeit von Netzbetreiber
- möglicher Einfluss auf Abwasserreinigung

2.3 Auf bzw. nach der Kläranlage

Wo immer möglich, bietet die Abwasserwärmenutzung auf bzw. nach der Kläranlage sicherlich die effizienteste Art der Nutzung. Für sie sprechen die folgenden Vorteile:

- kein Einfluss auf Abwasserreinigung
- deutlich geringer belastetes Wasser
- kein zusätzlicher Betriebspunkt

Einziger, nennenswerter Nachteil, der allerdings oft ausschlaggebend ist, sind die häufig langen Transportwege von der Kläranlage zum potenziellen Wärmenutzer.

Aufgrund der deutlichen Vorteile wurden Anlagen zur Abwasserwärmenutzung schon mehrfach auf Kläranlagen in Baden-Württemberg installiert (in der Regel in Kombination mit einer Anlage zur Schlamm Trocknung).

Die Wärmenutzung auf der Kläranlage vor der biologischen Stufe kann von ihren Vor- und Nachteilen her im Wesentlichen der Wärmenutzung im Entwässerungssystem gleichgesetzt werden (siehe vorhergehendes Kapitel). Ein zusätzlicher Nachteil ist dabei die in der Regel lange Transportstrecke zum Wärmenutzer (außerhalb der Kläranlage).

2.4 Haupt- und Nebenstrom

An jedem der genannten Orte kann der Wärmetauscher im Haupt- oder im Nebenstrom (Bypass) angeordnet sein. Die Vorteile der jeweiligen Anordnungen sind im Folgenden aufgelistet.

Hauptstrom:

- kein zusätzlicher Platzbedarf
- kein Ausleitbauwerk (mit Grobstoffentfernung) notwendig
- keine Förderpumpe notwendig

Nebenstrom (Bypass):

- unabhängig vom Kanalbetrieb
- begehbare Kompaktanlage und trockene Aufstellung möglich (günstige Wartungs- und Instandsetzungsmöglichkeit)
- einfach rückbaufähig
- Wärmetauscher nicht von Geometrie des Kanals abhängig

3 FUNKTIONSWEISE EINER ANLAGE ZUR ABWASSERWÄRMENUTZUNG (IM KANAL- NETZ)

3.1 Prinzipieller Aufbau der Anlage

Um dem Abwasser Wärme zu entziehen, werden eigens hierfür entwickelte Wärmetauscher eingesetzt, die an der Sohle vorhandener oder neu zu verlegender Abwasserkanäle eingebaut werden (Rinnenwärmetauscher). Alternativ dazu sind auch „Bypass-Lösungen“ möglich. Bei diesen ist die Form der Wärmetauscher variabel.

Rinnenwärmetauscher bestehen üblicherweise aus einer Edelstahl-Doppelschale, die von einem Zwischenmedium durchflossen wird (Kreislauf Wärmeübertragungsmedium, Sekundärkreislauf). Dieses ist in der Regel reines Wasser. Über unisolierte Kunststoffrohre wird das Zwischenmedium vom Wärmetauscher zum Verdampfer der Wärmepumpe und zurück geleitet. Am Wärmetauscher wird das Wasser im Sekundärkreislauf durch das Abwasser erwärmt, am Verdampfer der Wärmepumpe wieder abgekühlt. Getrieben wird der Sekundärkreislauf von einer konventionellen Umwälzpumpe.

Die auf einem Temperaturniveau von ca. 8 °C - 12 °C dem Abwasser entzogene Wärme wird durch die Wärmepumpe auf ein nutzbares Temperaturniveau (50 °C - 55 °C) „gepumpt“. Die Temperaturerhöhung erfolgt durch Verdichtung eines Kältemittels im Kompressor der Wärmepumpe im Kältemittelkreislauf. Dabei gilt, dass die Gesamtanlage desto wirtschaftlicher arbeitet, je kleiner die zu „pumpende“ Temperaturdifferenz ist. Diese Temperaturdifferenz kann durch die Wahl der im Gebäude eingesetzten Heizelemente entscheidend beeinflusst werden (Einsatz von Flächenheizungen).

Schließlich kann die Wärme dem Nutzer zur Verfügung gestellt werden (Kreislauf Heizmedium, Primärkreislauf). Abbildung 2 verdeutlicht den Aufbau grafisch. Eine detaillierte Darstellung befindet sich im Anhang 1.

Die Heizanlage kann entweder in einem eigenen Gebäude oder im Heizraum eines bestehenden Gebäudes untergebracht werden. Mehrere Objekte können von einer Heizzentrale aus über Wärmeleitungen versorgt werden.

Meist wird für die Bedarfsdeckung an Tagen mit überdurchschnittlichem Wärmebedarf zusätzlich zur Wärmepumpe ein Gas- oder Ölheizkessel eingesetzt (bivalente Wärmepumpen-Anlage). Damit kann die Betriebssicherheit erhöht und gleichzeitig die Wärmepumpe wirtschaftlicher betrieben werden, da sie dann kleiner dimensioniert wird und so längere Betriebszeiten unter Volllast erreicht. In erdgasversorgten Gebieten ist die Kombination der Abwasser-Wärmepumpe mit einem Blockheizkraftwerk (BHKW) möglich. Dabei wird der Strom für den Antrieb der Wärmepumpe vom BHKW geliefert, die Gesamtanlage ist dadurch besonders effizient, da die sonst entstehenden Wirkungsgradverluste bei der Stromerzeugung und -verteilung entfallen. (/1/)

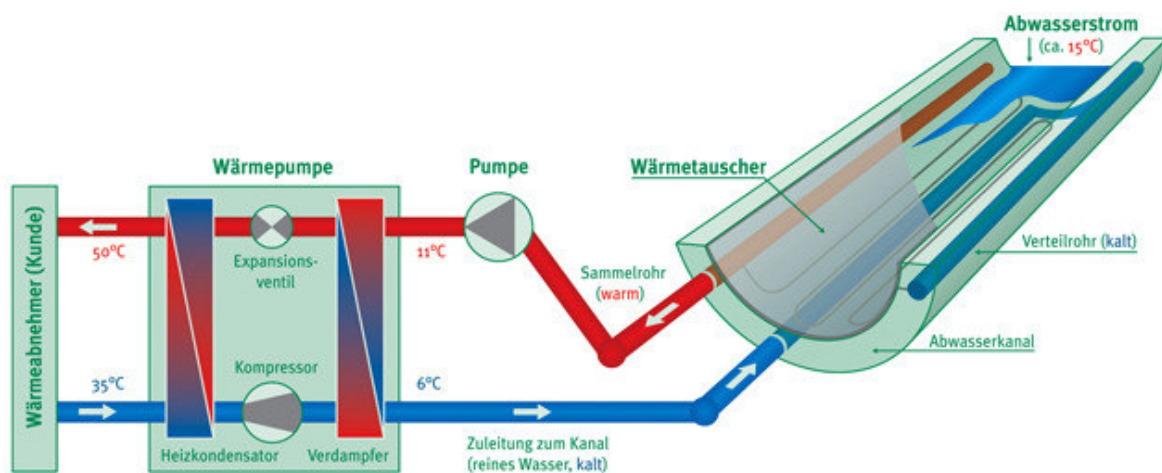


Abb. 2: Prinzipieller Aufbau der Abwärmenutzung aus Abwasser im Abwasserkanal (Quelle: Wallstein Ingenieur GmbH)

3.2 Rinnenwärmetauscher

Ein Wärmetauschermodul ist bis zu 3 m lang, die Wandstärke der Edelstahlschale beträgt 1,5 bis 3 mm. Es kann von Nutzungsdauern von über 50 Jahren ausgegangen werden.

Die Wärmetauscher werden entweder in bestehende oder neue Kanäle mit ausreichendem Querschnitt und Sohlgefälle eingebaut oder bei neuen Kanälen bzw. Kanalauswechslungen als vorgefertigte Bauteile komplett mit dem Abwasserrohr installiert. Abbildung 3 zeigt ein Wärmetauschermodul für den nachträglichen Einbau. Abbildung 4 zeigt ein Photo solcher Module in einem Kanal. Anhang 2 zeigt Skizzen weiterer Ausführungsarten nachträglich eingebauter Wärmetauscher.

Abbildung 5 zeigt die vorgefertigten Wärmetauscher im Betonwerk vor dem Einbringen in die Schalung, Abbildung 6 ein fertiges Rohr mit integriertem Wärmetauscher.



Abb. 3: Nachträglich einsetzbares Wärmetauschermodul



Abb. 4: Nachträglich einsetzbares Wärmetauschermodul im Kanal (RÜB Saarstraße, Bretten)



Abb. 5: Vorgefertigter Wärmetauscher im Betonwerk vor dem Einbringen in die Schalung (aus: /2/)



Abb. 6: Betonrohr mit integriertem Wärmetauscher (aus: /1/)

3.3 Externe Wärmetauscher („Bypass-Lösung“)

Externe Wärmetauscher benötigen ein Modul zur Entnahme und (Vor-)Reinigung des Abwassers, zudem muss der entnommene Teilstrom stets gepumpt werden. Diese Systeme sind deswegen in Bau und Betrieb in der Regel aufwändiger und Rinnenwärmetauschern daher wirtschaftlich unterlegen. Rinnenwärmetauscher sind jedoch nicht immer einsetzbar und externe Wärmetauscher können im Vergleich zu konventionellen Heizungssystemen ebenfalls eine wirtschaftliche Lösung zur Beheizung von Gebäuden darstellen.

Externe Wärmetauscher werden nach Kenntnis der Autoren als „Komplettpaket“ im deutschsprachigen Raum lediglich von einer einzigen Firma angeboten. Von diesem System gibt es zur Zeit noch keine laufende Referenzanlage im deutschsprachigen Raum. Zwei Anlagen befinden sich allerdings im Bau, eine Anlage an der Côte d'Azur läuft als Testanlage von Veolia. Die Abb. 7 zeigt eine Prinzipskizze des Gesamtsystems eines externen Wärmetauschers, in Abb. 8 wird das eigentliche Wärmetauschermodul dargestellt.

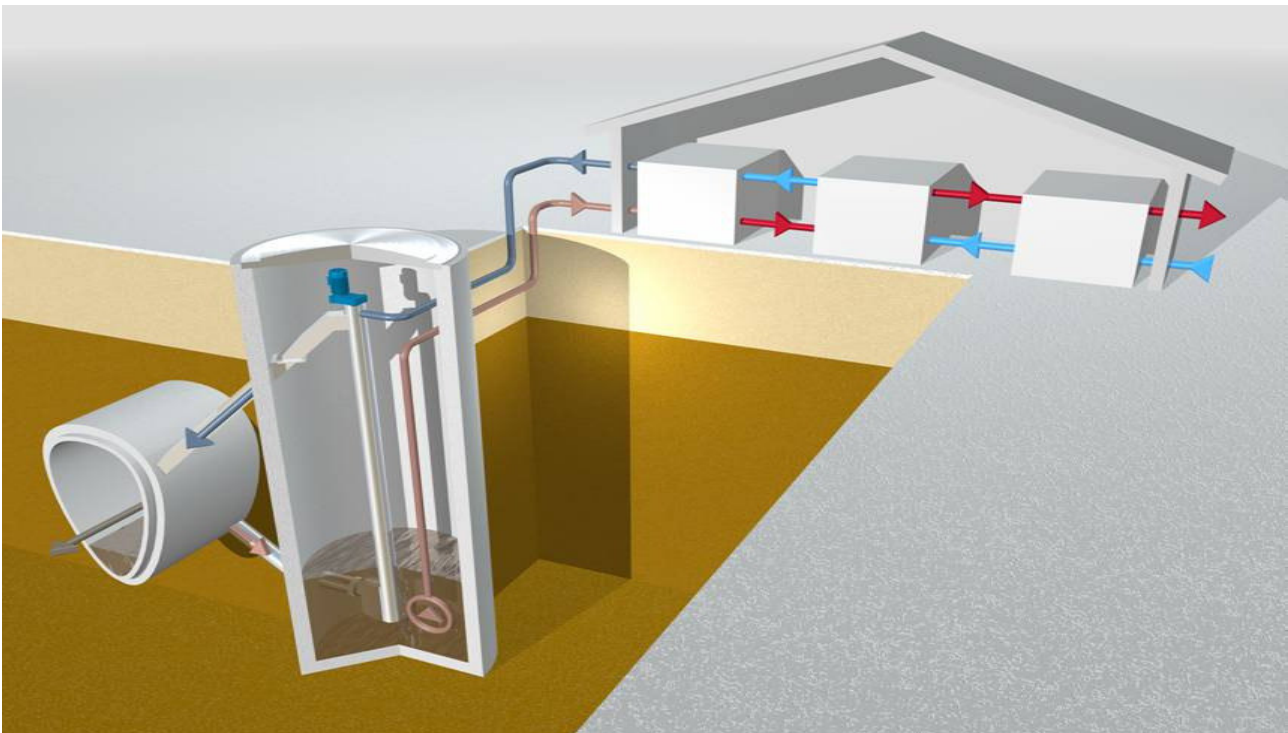


Abb. 7: Prinzipskizze des Gesamtsystems eines externen Wärmetauschers
(Quelle: Fa. Huber AG, Berching)

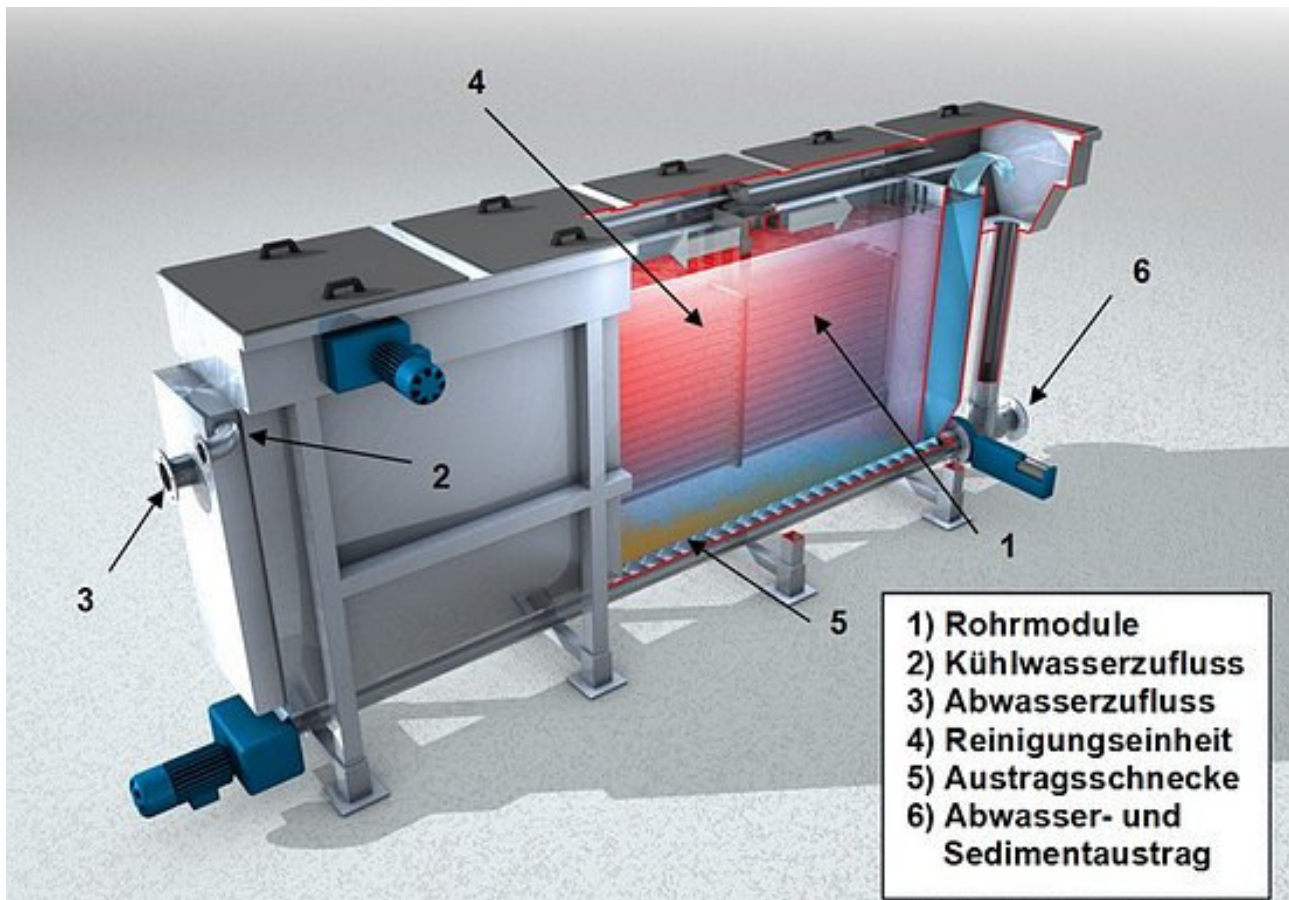


Abb. 8: Wärmetauschermodul eines externen Wärmetauschersystems
(Quelle: Fa. Huber AG, Berching)

3.4 Das Prinzip der Wärmepumpe

Bekanntester Einsatzort einer Wärmepumpe ist jeder handelsübliche Kühlschrank: Ein Kühlschrank entzieht den Lebensmitteln die Wärme und gibt diese nach außen ab. Nach demselben Prinzip, nur mit umgekehrter Intention, arbeiten auch Wärmepumpen in der Heiztechnik: Sie entnehmen Wärme aus dem Abwasser (kühlen dieses also) und geben diese Wärme als Heizwärme ab.

Jeder Wärmepumpenprozess kann in vier Stufen eingeteilt werden, in denen das Kältemittel verschiedene Zustandsänderungen eingeht und die es im Kreis durchläuft:

1. Verdampfung
2. Verdichtung
3. Kondensation (verflüssigen)
4. Expansion (entspannen)

1.) Verdampfung

Im Verdampfer geht das Kältemittel vom flüssigen in den dampfförmigen Zustand über. Die Verdampfung erfolgt unter Zufuhr von Wärmeenergie, die dem Sekundärkreislauf über einen Wärmetauscher in der Wärmepumpe entzogen wird.

2.) Verdichtung

Das gasförmige Kältemittel wird vom Kompressor angesaugt und durch die Verdichtung auf hohen Druck und hohe Temperatur gebracht. Zusätzlich nimmt das Kältemittel noch die Wärme auf, die der Antriebsenergie des Kompressors entspricht.

3.) Kondensation

Das dampfförmige Kältemittel wird mit hoher Temperatur in den Kondensator - wiederum ein Wärmetauscher - gedrückt und gibt dort seine Wärme an das Heizungswasser ab. Dabei wird der Kältemitteldampf kondensiert.

4.) Expansion

Um den Kältekreislauf wieder zu schließen, muss das Kältemittel vom hohen Druck auf den Ausgangsdruck entspannt werden. Dabei wird das Kältemittel kalt und kann dann im Verdampfer wieder Energie aufnehmen.

Ebenso wie ein Kühlschrank benötigt auch eine Wärmepumpe Antriebsenergie, welche meist durch elektrischen Strom geliefert wird. Der Unterschied zwischen Kühlschrank und Wärmepumpe liegt also nur darin, dass abnehmerseitig beim einen die Kälte und beim anderen die Wärme genutzt wird.

3.5 Nutzung zu Kühlzwecken

Im Sommer können Anlagen zur Abwasserwärmenutzung auch zur Raumkühlung eingesetzt werden. Das Abwasser wird dann über die Wärmetauscher erwärmt. Dazu wird das Kältemittel in umgekehrter Richtung gepumpt, was über ein Ventil erreicht wird (s. Abbildung 9). Außerdem wird ein zweites Expansionsventil benötigt. Durch den Zusatznutzen erhöht sich die Wirtschaftlichkeit der

Anlage. Aus diesem Grund sollte die Nutzung der Wärmetauscher auch zu Kühlzwecken wo immer möglich vollzogen werden.

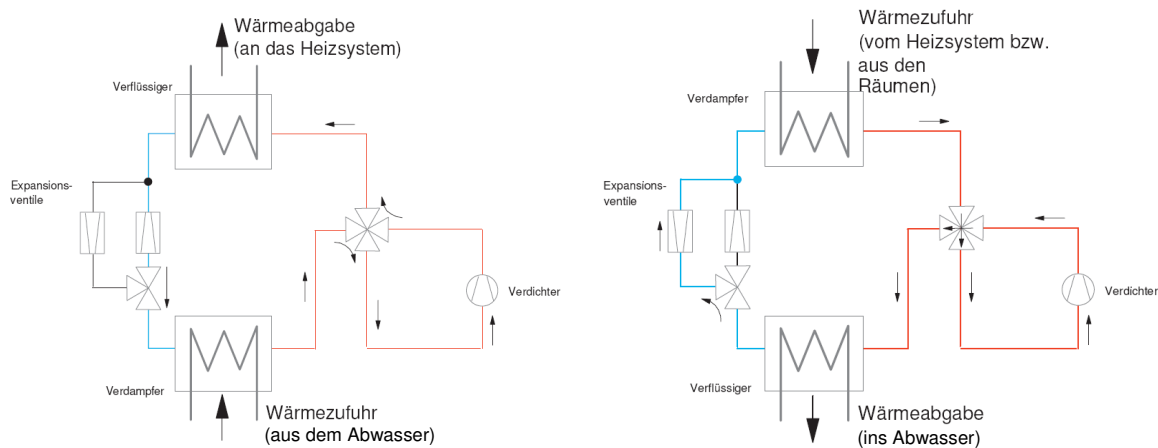


Abb. 9: Vereinfachtes Funktionsschema für eine Wärmepumpe mit umkehrbarer Betriebsweise im Heizbetrieb (links) und im Kühlbetrieb (rechts), modifiziert nach /7/

Es liegt dabei auf der Hand, dass eine solche Nutzung – viel mehr noch als die Wärmenutzung – eng mit der Architektur eines Gebäudes verwoben ist und deshalb sinnvoll nur dann genutzt werden kann, wenn sie bereits zu einem sehr frühen Planungsstadium in Betracht gezogen und optimal in die Nutzungsplanung integriert wird.

3.6 Effizienzkriterien

Die Effizienz einer Anlage wird anhand von Kennzahlen beurteilt.

Das Verhältnis zwischen der Wärmeleistung, die ans Heiznetz abgegeben wird, und der aufgenommenen, elektrischen Leistung der Wärmepumpe ergibt die Leistungszahl ε :

$$\text{Leistungszahl } \varepsilon [-] = \frac{\text{Wärmeleistung ins Heiznetz [kW]}}{\text{aufgenommene Leistung der Wärmepumpe [kW]}}$$

Moderne Elektro-Wärmepumpen erzielen Leistungszahlen zwischen 3,5 und 5,5. Pro Kilowattstunde elektrischer Energie (1 kWh) wird also eine Wärmemenge von 3,5 bis 5,5 kWh in Form von Wärme „erzeugt“.

Die Leistungszahl gilt jedoch nur für einen bestimmten Betriebspunkt und ändert sich in Abhängigkeit der Abwasser- und Heizungsvorlauftemperaturen ständig. Sie lässt außerdem die Leistung

elektrischer Hilfsaggregate unberücksichtigt, die nicht unmittelbar zum Wärmepumpen-Prozess gehören (z.B. die Umwälzpumpen für den Heizungs- und Wärmetauscherkreislauf).

Für Jahresbilanzen wird deswegen die Jahresarbeitszahl β herangezogen. Diese Kennzahl ist der Quotient aus der über ein Jahr hinweg abgegebenen Wärmeenergie (Heizenergie) und der im gleichen Zeitraum insgesamt zugeführten Antriebsenergie für das Wärmepumpensystem:

$$\text{Jahresarbeitszahl } \beta [-] = \frac{\text{abgegebene Heizwärme im Jahr [kWh]}}{\text{gesamte Antriebsenergie im Jahr [kWh]}}$$

Typische Werte der Jahresarbeitszahl moderner Wärmepumpenanlagen liegen im Bereich über 3,5.

4 WIRTSCHAFTLICHKEIT, ENERGIE- UND CO₂-BILANZEN, VERTRAGSGESTALTUNG

4.1 Wirtschaftlichkeit

Für die Wirtschaftlichkeit einer Anlage zur Abwasserwärmenutzung ist es positiv, wenn möglichst große Gebäude (Wärmeabnehmer) mit möglichst niedrigen Heizungsvorlauftemperaturen angeschlossen werden können und die Distanz vom Ort der Wärmeentnahme bis zum Abnehmer möglichst klein ist.

Kostensynergien ergeben sich dann, wenn eine Anlage zur Abwasserwärmenutzung in Zusammenhang

- mit einer sowieso anstehenden Erneuerung/einem sowieso anstehenden Neubau eines Kanals oder
- mit einer sowieso anstehenden Erneuerung/Sanierung eines Heizungssystems oder sogar eines sowieso anstehenden Gebäudeneubaus

geplant und realisiert werden kann.

Wie bereits erwähnt, sollten die Anlagen in der Regel bivalent ausgelegt sein, um für die Wärmepumpe höhere Laufzeiten unter Volllast zu erreichen. Bei einer Planung sollte weiterhin die Nutzung der Anlage auch zu Kühlungszwecken untersucht werden.

Schließlich ist aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen (s.u.) der Primärenergieeinsatz zum Betrieb der Wärmepumpe von Bedeutung. Anzustreben ist deswegen die Koppelung mit einem Blockheizkraftwerk (BHKW).

Neben den genannten, „technik-orientierten“ Gesichtspunkten der Wirtschaftlichkeit gibt es eine Reihe weiterer Punkte, die die Wirtschaftlichkeit beeinflussen:

- **Fördergelder**
Fördergelder senken die Investitionskosten für den Bauherrn mitunter erheblich. Mit dem Klimaschutz-Plus-Programm des Landes Baden-Württemberg bzw. dem Europäischen Fond für regionale Entwicklung (EFRE) werden auch Abwasser-Wärmepumpen gefördert.

Die Förderung bei Klimaschutz-Plus erfolgt durch einen Zuschuss. Die Höhe des Zuschusses richtet sich nach der über die anrechenbare Lebensdauer (15 Jahre) eingesparten CO₂-Menge. Der Fördersatz liegt bei 50,-- €/t CO₂. Die Fördersumme ist relativ auf 25 % (EFRE: 20 %) der förderfähigen Netto-Investitionskosten und absolut auf 400.000,-- € begrenzt (bei Freizeiteinrichtungen: 150.000,-- €, EFRE: 100.000,-- €).

Eine Alternative ergibt sich aktuell auch aus den „Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt“ vom 20. Februar 2009 (Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit), die sich auf das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz des Bundes beziehen. Die Basisförderung für effiziente Wärmepumpen des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) beträgt – je nach Datum der Bauantragsstellung – 5 bzw. 10 €/m² und ist auf 10 % der nachgewiesenen Nettoinvestitionskosten für die Wärmepumpenanlage begrenzt.

- Preisentwicklung Wärmetauscher und Wärmepumpen

Der weltweite Anstieg der Edelstahlpreise ist inzwischen auch der breiten Öffentlichkeit bekannt. Da Abwasserwärmetauscher aus diesem Werkstoff gefertigt sind, sind sie von diesem Preisanstieg direkt betroffen. Ein Ende dieses Trends ist derzeit nicht abzusehen, auch wenn wirtschaftliche Turbulenzen vorübergehend für eine Entspannung sorgen.

Bezüglich Abwasserwärmetauschern ist aufgrund ständiger Fortentwicklung und der steigenden Nachfrage (= höhere Stückzahlen) zurzeit ein deutlicher Trend zu günstigeren Preisen zu beobachten.

Unsicher ist die Entwicklung der Kosten für Wärmepumpen, sofern die beschriebene Technik hier zu höheren Stückzahlen führt.

- Berücksichtigung externer Kosten

Bei einer Vollkostenrechnung werden neben den Kapital- und den Betriebskosten auch die externen Folgen der Energienutzung kalkuliert (Umweltschäden, Auswirkungen auf die Gesundheit), die bei umweltfreundlichen Heizsystemen geringer ausfallen. Denkbar sind außerdem mögliche Gutschriften bei der Erfüllung von Energiestandards und Wärmeschutzvorschriften, günstige Bedingungen bei der Kapitalaufnahme oder die Befreiung von zukünftigen Umweltabgaben. Als ein Beispiel für derartige, zukünftig zu erwartende Gesetze sei das unlängst von der Landesregierung beschlossene Wärmegesetz genannt.

Schwer zu beziffern ist schließlich der mit einer solchen Anlage verbundene Imagegewinn.

- Bei bisherigen Projektstudien wird davon ausgegangen, dass ein möglicher Investor die Abwasserwärme kostenlos nutzen kann (keine Nutzungsgebühren). Bei größerer Verbreitung dieser Technologie wird aber die Frage nach dem Wert dieses Energiepotenzials zu stellen sein, da sie weiteren Interessenten nicht beliebig oft zur Verfügung steht und grundsätzlich mögliche Erträge dem Gebührenzahler zugute kommen sollten.

Die Kosten des Kanalnetzbetreibers, die dieser beim Einbau und Betrieb der AWNA ggf. zur Verfügung stellen muss, sind hingegen einzukalkulieren.

4.2 Energie- und CO₂-Bilanzen

Selbstverständlich muss auch zum Betrieb der Wärmepumpe Energie zur Verfügung gestellt werden, z.B. in Form von Strom oder Gas. Die von der Wärmepumpe schließlich abgegebene Wärmeenergie übertrifft diese jedoch in Abhängigkeit der Antriebsenergie und der Leistungsziffer um das 1,5 bis 5-fache da die Wärmepumpe zusätzlich die Wärme aus dem Abwasser nutzt. Die Abwasserwärme wiederum fällt sowieso an und muss in einer Energiebilanz nicht berücksichtigt werden. In Abbildung 10 wird dies grafisch dargestellt.

Durch eine CO₂-Bilanz wird sichtbar, dass die Energiequelle, aus der der Antrieb der Wärmepumpe gespeist wird, für die Umweltfreundlichkeit der Anlage von großer Bedeutung ist. In Anbetracht der heutigen und zukünftig zu erwartenden Energiepreise gilt Analoges auch für die Wirtschaftlichkeit.

Wird die Wärmepumpe mit Strom betrieben, so muss pro kWh elektrischer Energie ein mittlerer, spezifischer CO₂-Emissionsfaktor von 514 g CO₂/kWh angesetzt werden. Dieser liegt weit über den Emissionsfaktoren der Energieträger selbst (Kohle: 338 g CO₂/kWh), da hierbei auch die schlechten Wirkungsgrade in der Erzeugung der Elektrizität berücksichtigt werden müssen (weniger als 40 %). Durch den Wirkungsgrad der Wärmepumpe (hier angenommene Jahresarbeitszahl: 4) ergibt sich für das gesamte Heizungssystem hingegen nur ein CO₂-Ausstoß von rund 129 g CO₂/kWh Wärmeenergie (Beispiel 1 in Abbildung 11).

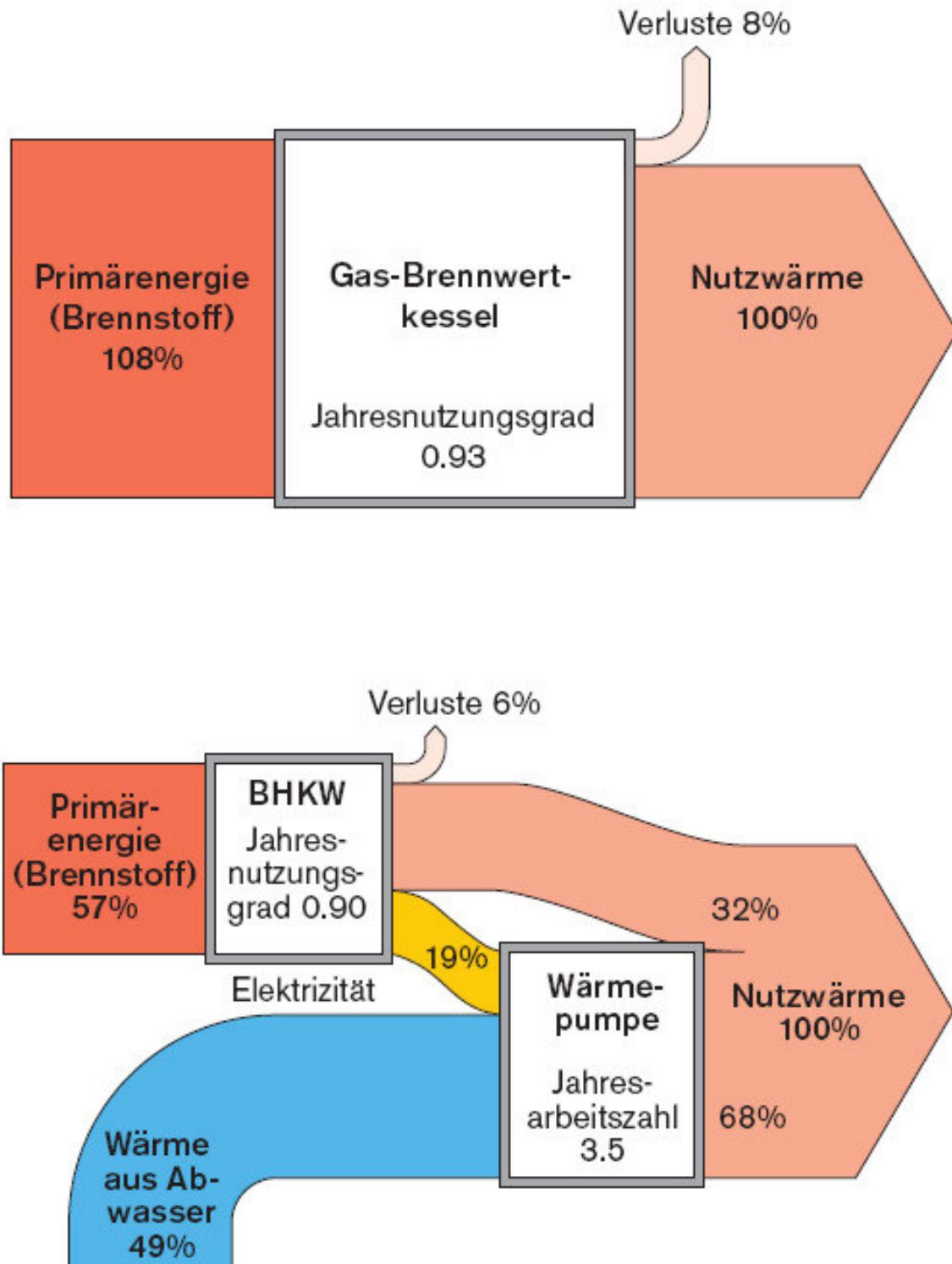


Abb. 10: Energieflüsse beim Einsatz eines Gas-Brennwert-Kessels im Vergleich zu einer Wärmepumpe mit BHKW (aus: /3/)

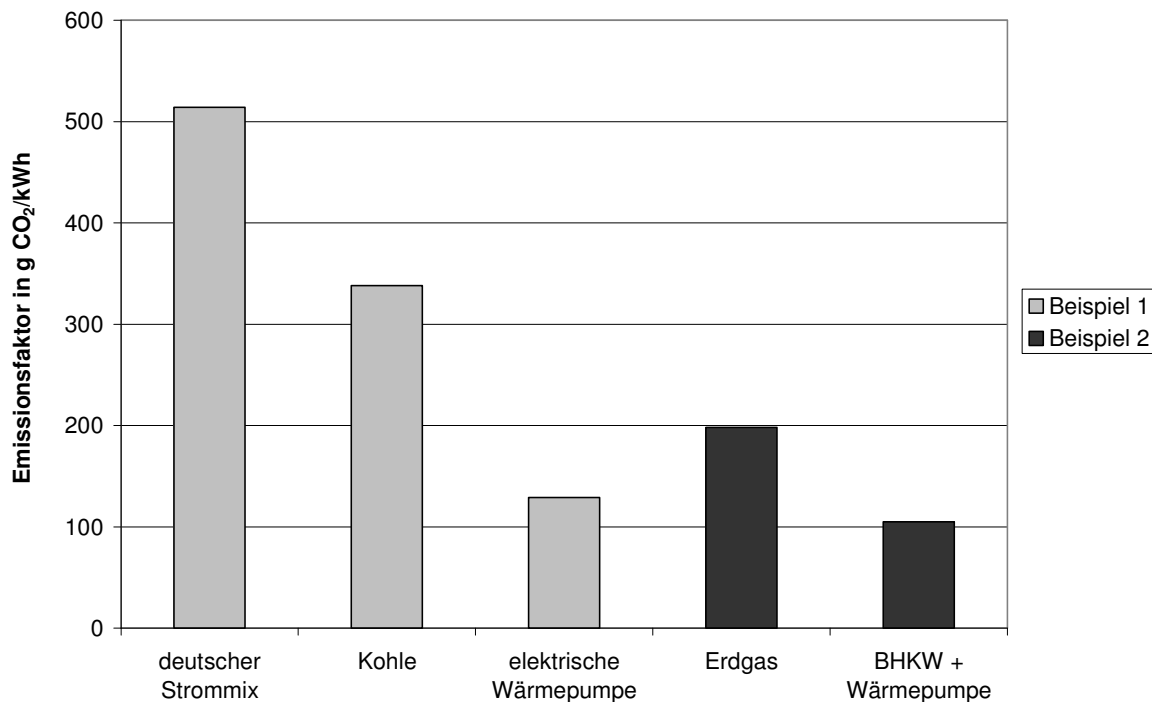


Abb. 11: Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger bzw. Wärmequellen

Wird die Wärmepumpe mit dem Strom eines BHKW betrieben, so schlägt neben dem niedrigeren CO₂-Emissionsfaktor von Erdgas (198 g CO₂/kWh) der erzeugte Strom (Wirkungsgrad rund 35 %) und die gewonnene Wärme („thermischer Wirkungsgrad“ rund 50 %) positiv zu buche. Nimmt man erneut eine Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe von 4 an, so ergibt dies einen CO₂-Ausstoß von weniger als 105 g CO₂/kWh. Das ist noch einmal annähernd 20 % unter dem Wert der elektrisch betriebenen Wärmepumpe. Zur Verdeutlichung sind die berechneten Emissionsfaktoren in Abbildung 11 noch einmal gegenübergestellt (Beispiel 2).

4.3 Ökobilanzen

Deutlich weiter als einfache CO₂-Bilanzen, die lediglich den spezifischen CO₂-Ausstoß im Betrieb quantifizieren, gehen Ökobilanzen. Mit Hilfe dieser können die Emissionen und der Ressourcenverbrauch unterschiedlicher Heizvarianten von der Herstellung der Maschinen über den Betrieb bis zur Entsorgung bewertet werden. Da verschiedene Methoden Umweltwirkungen unterschiedlich operationalisieren und die verschiedenen Umweltwirkungen unterschiedlich untereinander wichten, können sie auch zu vollkommen verschiedenen Ergebnissen führen.

In /5/ wurden eine elektrische Wärmepumpe¹ mit einem Erdgaskessel² verglichen. Die Herkunft des Stroms für die Wärmepumpe wurde einmal angenommen als Schweizer Strommix (Strom CH), einmal als Strom aus einem Gas- und Dampfkraftwerk (GuD Strom) und einmal als „Ökostrom“ (Schweizer Qualitätslabel naturemade star).

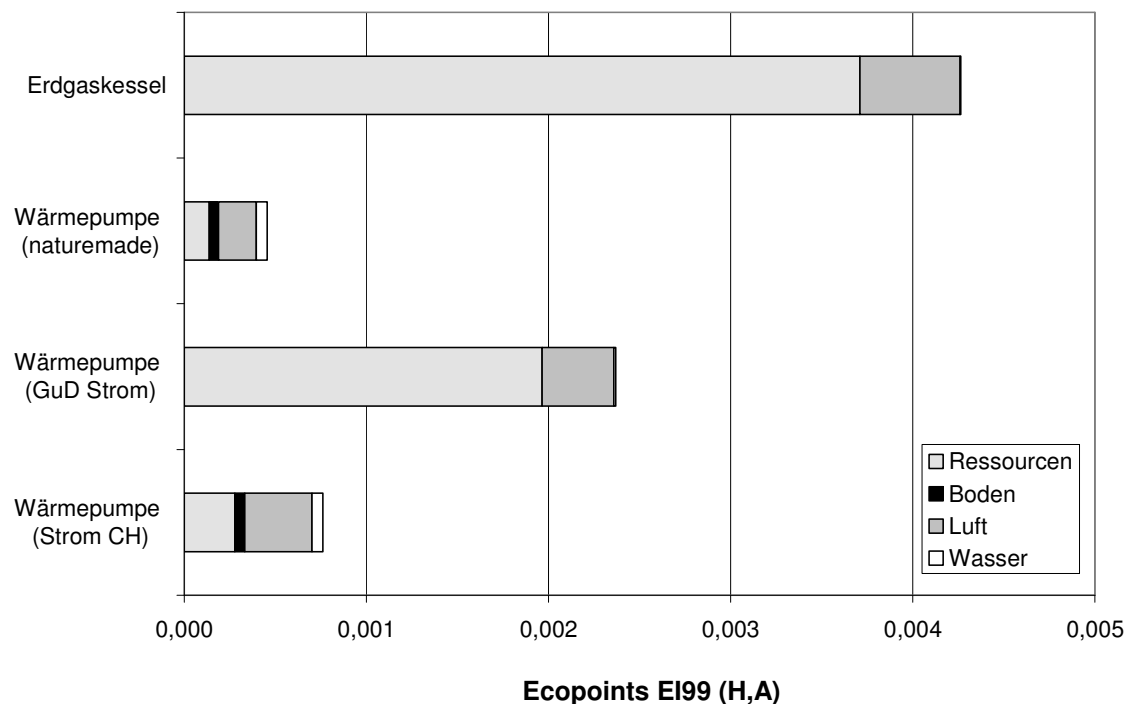


Abb. 12: Bewertung verschiedener Heizvarianten
(Methode Eco-indicator (H, A), Bezugsgröße 1 MJ_{Nutz}, aus: /5/)

Abbildung 12 zeigt das Ergebnis dieses Vergleichs mittels der schadensorientierten Bewertungsmethode Eco-indicator 99. Dabei werden für Ressourcenverbrauch sowie die Verschmutzung von Boden, Luft und Wasser Punkte vergeben. In diesem Beispiel schlägt vor allem der Ressourcenverbrauch (hauptsächlich das Erdgas) negativ zu Buche, an zweiter Stelle steht die Luftverschmutzung.

Ganz anders ist das Ergebnis, wenn man die Methode der ökologischen Knappheit 1997 anwendet (siehe Abbildung 13). Dabei werden, in den gleichen Kategorien wie bei der Methode Eco-indicator 99, Umweltbelastungspunkte (UBP) vergebenen. Das deutlich unterschiedliche Bild resul-

¹ Kältemittel Propan

² kondensierend-modulierend, Leistung größer als 100 kW

tiert daher, dass die UBP den Anfall radioaktiver Abfälle und Kohlendioxid-Emissionen deutlich negativer bewerten.

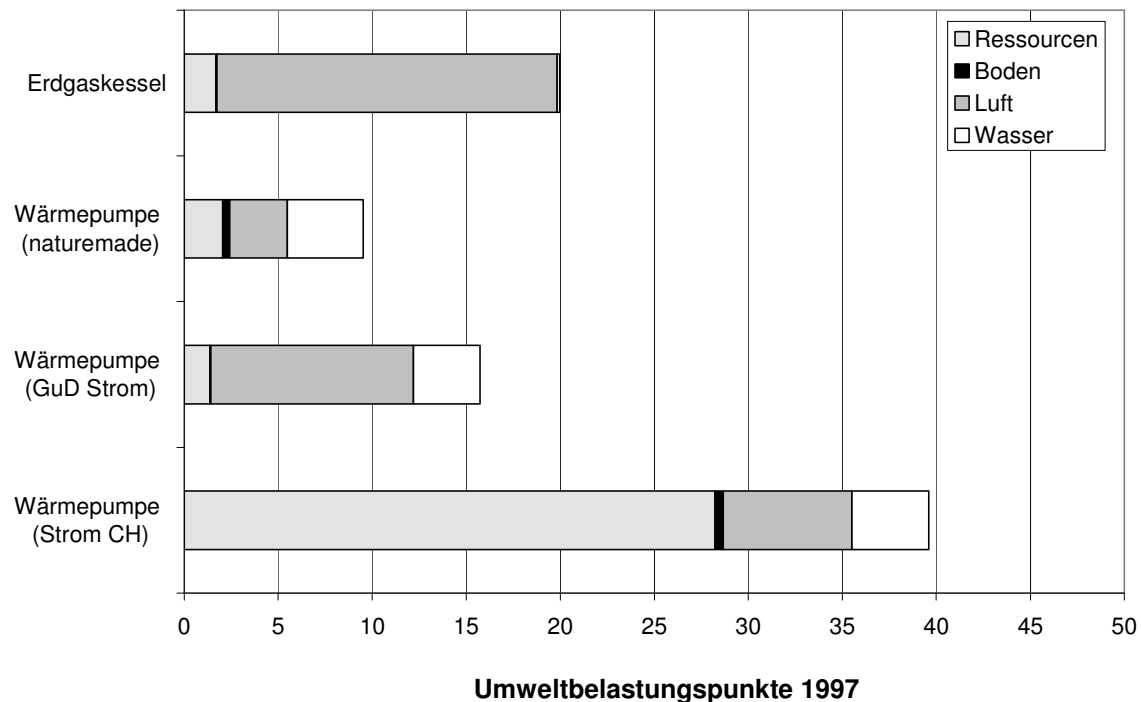


Abb. 13: Bewertung verschiedener Heizvarianten
(Methode ökologische Knappheit 1997, Bezugsgröße 1 MJ_{Nutz}, aus: /5/)

Das differierende Ergebnis der beiden Methoden ist eher die Regel als die Ausnahme. Dabei fehlt es den Methoden nicht an der wissenschaftlichen Begründung, sondern viel mehr an einem gesellschaftlichen Konsens, anhand dessen die Bewertung durchgeführt werden könnte (/6/).

4.4 Hinweise zur Vertragsgestaltung

In den seltensten Fällen betreiben die Entwässerungsbetriebe selbst die Anlage zur Abwasserwärmennutzung. Bei den beiden vom Ingenieurbüro Klinger und Partner bisher realisierten Anlagen haben jeweils die örtlichen Stadtwerke diese Aufgabe übernommen. Obwohl die Anlage damit insgesamt weiterhin mehr oder weniger direkt unter kommunaler Aufsicht steht und damit „unter einem Dach“ bleibt, sollten die Rechte und gegenseitigen Pflichten vertraglich geregelt werden. Dieser Vertrag kann knapp und am sachlich notwendigen orientiert gehalten werden: Der im DWA-Merkblatt M-114 (/9/) vorgestellte Vertrag umfasst nur eine Seite! Er ist im Anhang 3 dokumentiert.

Die Frage nach einem möglichen, finanziellen Ausgleich für die entzogene Wärme wurde bereits im Kapitel 4.1 diskutiert.

5 BEISPIELE BISHER AUSGEFÜHRTER ANLAGEN

Im Folgenden werden bekannte, bereits realisierte Anlagen zur Abwasserwärmenutzung (vorran-
gig in Deutschland) dargestellt. Es wird dabei, wie bereits in /10/, einerseits nach Zeitphasen und
andererseits nach dem Ort des Wärmeentzugs differenziert.

5.1 Wärmeentzug innerhalb der Liegenschaft

In der Schweiz wurden bereits mehr als 200 solcher Anlagen realisiert, in Deutschland besteht
hingegen nur eine geringe Verbreitung. Bekannt sind zwei Anlagen im Stuttgarter Mineralbad Leu-
ze, die Wärme aus Duschwasser bzw. Schwallwasser zurückgewinnen.

5.2 Wärmeentzug in der Kanalisation

Die Anlagen zur Abwasserwärmenutzung aus der Kanalisation können in Deutschland drei Gene-
rationen zugeordnet werden. Die Anlagen der ersten Generation wurden in den frühen 1980er-
Jahren errichtet, als die Technologie insgesamt neu war. Jede dieser Anlagen kann im Prinzip als
Pilotanlage bezeichnet werden.

Die erste deutsche Anlage wurde 1982 in Esslingen gebaut, der Probetrieb wurde im Mai des-
selben Jahres beendet. Über einen Rinnenwärmetauscher im Kanal wurde die Wärme zur Behei-
zung des „Salemer Pfleghofs“, einer Sozialstätte mit kulturellen Ausstellungsräumen, entzogen.
Die Stilllegung erfolgte aufgrund von Mängeln der Wärmepumpe, die Wärmetauscher sind aber
immer noch im Kanal installiert. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens, das vom Umweltministe-
rium des Landes Baden-Württemberg gefördert wird /11/, soll nun die Reaktivierung der Anlage
geprüft werden.

Weitere Beispiele dieser ersten Generation sind die Anlagen in Wiesbaden, die ebenfalls noch im
Jahr 1982 in Betrieb ging und das Hessische Finanzministerium beheizte, sowie die Anlage in Ber-
lin (Ost), die von Dezember 1983 bis vor wenigen Jahren störungsfrei lief. Die erste Generation hat
schon damals gezeigt, dass die Technologie bei guter Planung sehr zuverlässig funktioniert.

Der zweiten Generation gehören drei Anlagen an, die zwischen 2003 und 2005 in Singen, Lever-
kusen und Ludwigshafen von der gleichen Firma geplant wurden und nach Aussagen der Betreiber
noch nicht überall optimal laufen.

Zu der dritten Generation von Abwasserwärmenutzung werden die Anlagen ab dem Jahr 2006 gezählt. Die Anlage in Berlin (Ende 2006, Versorgung einer Schul- und Vereinssporthalle) ist die erste dieser Generation, die Brettener Anlage (2009), die von den Büros Schuler und Klinger und Partner geplant wurde, gilt als dritte (Versorgung eines Schulkomplexes, einer Sporthalle und mehrerer Wohnhäuser).

Zurzeit wächst die Zahl der Projekte stark, so dass es sehr schwierig ist, einen Überblick zu behalten. Bei folgenden Objekten sind die Wärmetauscher installiert und die Anlagen arbeiten im Probe- bzw. sogar Regelbetrieb:

- Tübingen, Versorgung Aischbachschule und Kindergarten
- Schkeuditz (Sachsen), Versorgung eines Kinderhorts
- Bochum, Versorgung Nordwestbad Bochum
- Pinneberg, Versorgung Gemeindezentrum mit Turnhalle, Feuerwehr, Polizei, Kindergarten, Grundschule und Bücherei
- Hamburg, Versorgung 110 Wohnungen
- München, Versorgung Betriebshof Münchener Stadtentwässerung
- Straubing (Bayern), Versorgung Wohnanlage mit 100 Wohnungen, erste deutsche Anlage im Bypass
- Stuttgart - Bad Cannstatt, Versorgung Mehrfamilienhäuser, Seniorenwohnungen und Pflegeheim

5.3 Wärmeentzug auf bzw. nach der Kläranlage

Bereits 1986 wurde in Waiblingen ein großer Wärmeverbund mit Wärmeentzug nach der Kläranlage aufgebaut. Versorgt werden damit bis heute zwei Dutzend private und öffentliche Gebäude mit insgesamt 6 MW Wärmeleistung.

Neuere Anlagen mit Wärmenutzung auf bzw. nach der Kläranlage wurden 2004 in Freiberg am Neckar (Versorgung einer Sporthalle und Umkleideräumen) sowie in Lingen (Versorgung eines Tagungshauses, Entzug der Wärme nach der Kläranlage der Erdölraffinerie Emsland) erstellt.

Auf der Kläranlage selbst ist die Nutzung der Abwasserwärme interessant, wenn ein speziell großer Wärmeverbraucher wie eine Schlamm Trocknung vorhanden ist. Das Wärmeangebot aus dem Abwasser ist derart groß, dass dieses für eine Klärschlamm Trocknung bei Weitem ausreicht. Solche Anlagen wurden zum Beispiel auf den Kläranlagen Hayingen, Ebersbach und Rudersberg mit 4500 bis 23 500 Einwohnerwerten eingebaut.

6 ENERGIEKARTE

6.1 In der Energiekarte dargestellte Kriterien

Die Energiekarte ist das zentrale Hilfsmittel bei der systematischen Suche nach geeigneten Standorten. Dies gilt sowohl für den Bestand, als auch für zukünftige Entwicklungen. In einer Energiekarte werden die Grenzkriterien aggregiert dargestellt, die für einen wirtschaftlichen Betrieb einer Abwasserwärmenutzungsanlage angenommen werden können.

Die genannten Grenzkriterien, die in Energiekarten dargestellt sind, ergeben sich dabei z.B. aus dem DWA-Merkblatt M 114 (/9/). Sie lauten

... bezogen auf das Kanalnetz:

- Mindestabfluss von 15 l/s (mittl. Trockenwetterabfluss $Q_{T,d,aM}$)
- Mindestdurchmesser von DN 800

... bezogen auf den Abstand des Wärmenutzers zum Kanal:

- Umgebung um den Kanal von 150 (Bereich 1) bzw. 300 m (Bereich 2)

Als zusätzliche Information wird das Versorgungsgebiet der EnBW für Fernwärme dargestellt, da dieses ebenfalls für die übergeordnete Planung von Heizungssystemen von Bedeutung ist.

In der Stufe 2 des Projektes, nach Beendigung der hydraulischen Berechnungen des Kanalnetzes, ist es geplant, die Energiekarte um die folgenden Elemente zu erweitern:

- Kriterium der hydraulischen Reserve von mindestens 10 % für die Haltungen

In einer Energiekarte wird nicht nur die Lage verschiedener Objekte dargestellt, sondern es ist auch die räumliche Beziehung dieser Objekte untereinander von Bedeutung. Deswegen drängt sich ein Geografisches Informationssystem (GIS) zur Bearbeitung und Darstellung förmlich auf. Im Projekt wurde mit dem GIS ArcView von ESRI gearbeitet.

Betrachtet wurde ohne Ausnahme das gesamte Kanalnetz der Stadt Stuttgart, also die den Klärwerken Möhringen, Plienigen, dem Gruppenklärwerk Ditzingen und dem Hauptklärwerk Mühlhausen zufließenden Abwässer. Für die Einzugsgebiete dieser Klärwerke wurde jeweils eine eigene Energiekarte im Maßstab 1:10.000 aufgestellt (im Fall Mühlhausen sogar mehrere).

6.1.1 Mittlerer Trockenwetterabfluss

Der (langjährige) mittlere Trockenwetterabfluss $Q_{T,d,am}$ der einzelnen Haltungen steht zum einen für das zur Verfügung stehende Wärmepotenzial, das mittels Wärmetauschern entzogen werden kann. Zum anderen stellt ein Mindestabfluss im Kanal bei Rinnenwärmetauschern sicher, dass diese überhaupt überströmt sind. Je nach vorhandener Datengrundlage wurde dieser Wert unterschiedlich ermittelt.

Trotz größter Sorgfalt bei diesem Schritt muss betont werden, dass für den Fall, dass sich im Rahmen von Machbarkeitsstudien der Abwasserabfluss für ein konkretes Projekt als ein limitierender oder kritischer Faktor herausstellt, vor der Einleitung weiterer Planungsschritte der geschätzte Wert des Abflusses unbedingt durch Messungen erhärtet werden sollte.

Die Trockenwetterabflüsse in den Einzugsgebieten der Klärwerke Möhringen und Plienigen, des Gruppenklärwerks Ditzingen sowie der Zulaufgruppe Feuerbach (Feuerbachtal) des Hauptklärwerks Mühlhausen wurden aus vorliegenden Schmutzfrachtberechnungen (/12/, /13/ und /14/) übernommen bzw. von diesen abgeleitet. Diese wurden in Abstimmung mit der SES erstellt, so dass die resultierenden Abflusswerte als verlässlich und geprüft gelten können.

Wesentliche Basis zur Ermittlung der restlichen Schmutzwasserzuflüsse zum HKW Mühlhausen (Zulaufgruppe Neckar-Nesenbach, außerhalb der Zulaufgruppe Feuerbach) waren adresscodierte Angaben zum abgerechneten Jahresfrischwasserverbrauch, die für das Jahr 2005 vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt wurden.

Diese wurden im ersten Schritt automatisiert geocodiert. Einige Verbrauchsstellen konnten dabei aufgrund mangelnder oder fehlerhafter Adressangaben nicht berücksichtigt werden. Diese stehen in ihrer Summe jedoch lediglich für 0,32 % des gesamten Verbrauchs und wurden deswegen im Weiteren vernachlässigt. Diejenigen Stellen ($n = 9$), die alleine einem Schmutzwasseranfall von über 5 l/s entsprechen, wurden per Hand bezüglich der Georeferenzierung validiert.

Eigenwassereinleitungen und Absetzungen wurden bei der Herleitung der Schmutzwasserabflüsse nicht berücksichtigt. Dies liegt daran, dass die entsprechenden Werte beim Auftraggeber nur als Summenwerte vorliegen, und nicht als Einzelwerte mit räumlichem Bezug. Bezogen auf die gesamte Stadt Stuttgart gleichen sich die beiden Größen in der Summe bis auf einen Differenzbetrag entsprechend 11 l/s (das sind 7,7 % der Absetzungen) aus.

Die Zuweisung der geocodierten Wasserverbrauchszahlen zu den einzelnen Sammlern (Strängen) des Kanalnetzes erfolgte über die Ausweisung von strangbezogenen Teileinzugsgebietsflächen, die abschließend in einem GeoInformationssystem mit den Wasserverbrauchszahlen überlagert wurden (siehe Abbildung 14).

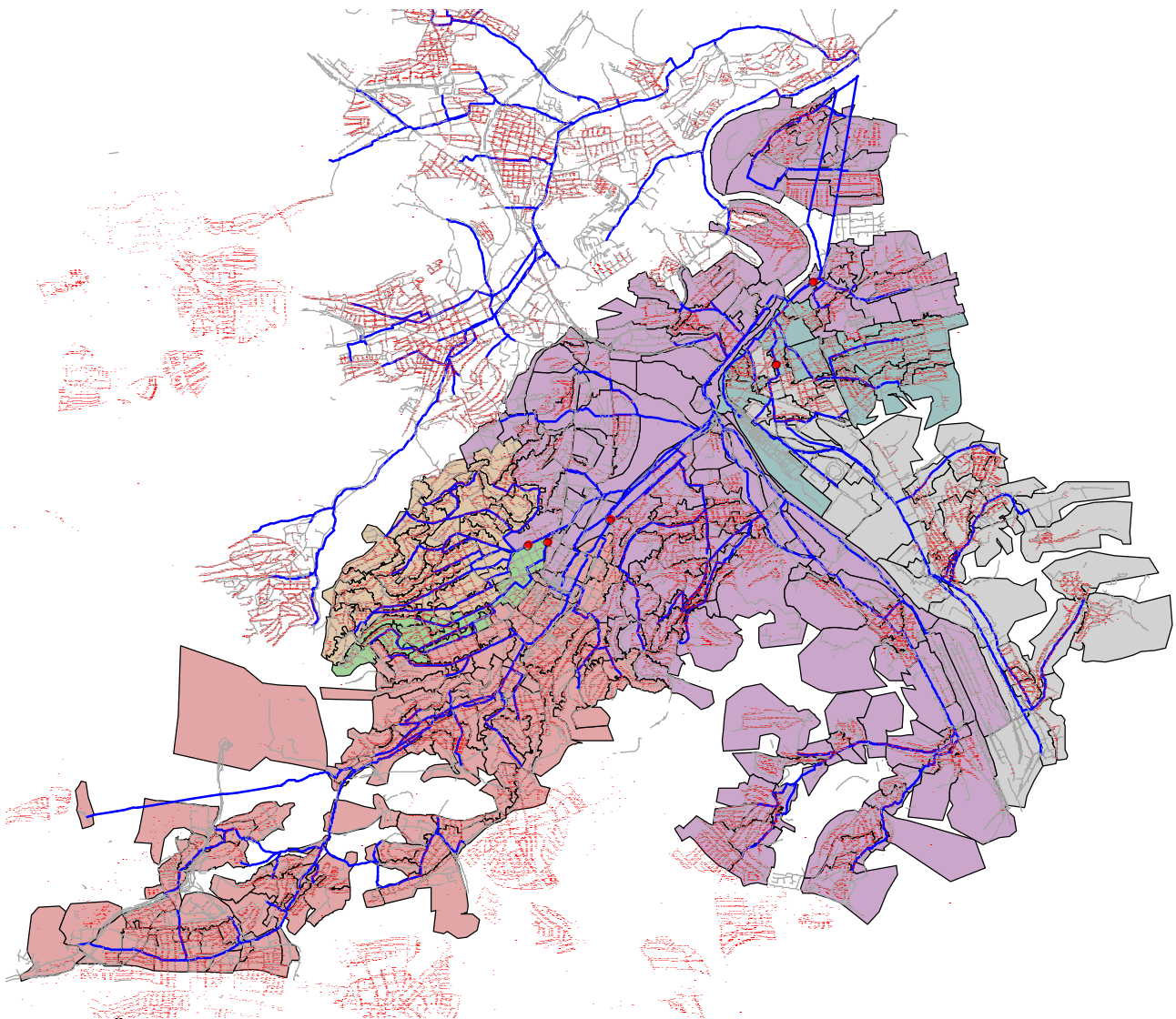


Abb. 14: Überlagerung der geocodierten Wasserverbrauchszahlen (rot) mit den ermittelten Teileinzugsgebieten der Hauptstränge des Stuttgarter Kanalnetzes (blau), Zulaufgruppe Neckar- Nesenbach (Farbgebung der Teileinzugsgebiete nach Einzugsgebieten der Abflussmessstellen)

Um eine geschlossene Kontroll-Bilanz der Schmutzwasserzuflüsse (und später Trockenwetterzuflüsse) zum HKW Mühlhausen zu ermöglichen, wurden abschließend noch die Schmutzwassermengen erhoben, die von außerhalb des Stadtgebietes dem Stuttgarter Kanalnetz zufließen. Dies sind

- die Zuflüsse von Remseck und Fellbach (v.a. Ortsteile Öffingen und Schmidlen), für diese lagen die gemeldeten Abwassermengen für das Jahr 2008 vor und
 - die Zuflüsse aus dem Kanalnetz der Stadt Esslingen, die aus der Potenzialstudie für die Stadt Esslingen (/15/) direkt übernommen werden konnten.
- Die Zuflüsse aus Korntal-Münchingen und Kornwestheim sind in der Abflussberechnung der Zulaufgruppe Feuerbach berücksichtigt worden.

Referenzgröße bei der Ermittlung der Fremdwasserabflüsse im Einzugsgebiet der Zulaufgruppe Neckar-Nesenbach war eine Ermittlung des Fremdwasserzuflusses zum HKW Mühlhausen. Dies geschah nach der Methode des gleitenden Minimums auf Basis der Tageszuflussmengen für die Jahre 2006 bis 2009, die vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt wurden.

Die Verteilung der Fremdwasserabflüsse innerhalb des Einzugsgebietes erfolgte flächendifferenziert. Fixpunkte waren dabei fünf Abflussmessstellen, an denen im Auftrag der SES über mehrere Wochen hinweg gemessen wurde. Mittels einer Abflussanalyse konnten für die jeweiligen Einzugsgebiete die mittleren Trockenwetterabflüsse in der Messperiode ermittelt werden. Aus der Differenz zu den bereits bekannten Schmutzwasserabflüssen ergaben sich so die Fremdwasserabflüsse. Diese wurden sogleich mit einem Korrekturfaktor belegt, der das Verhältnis des mittleren Fremdwasserabflusses in der Messperiode zum langjährigen, mittleren Fremdwasserabfluss berücksichtigt. Der Korrekturfaktor wurde aus den Fremdwasserauswertungen für das HKW Mühlhausen ermittelt. Die Verteilung der so ermittelten Fremdwasserabflüsse innerhalb des jeweiligen Messstellen-Einzugsgebiets (siehe Abbildung 14) erfolgte proportional zum (bekannten) Schmutzwasserabfluss.

Der Fremdwasserabfluss, der aus dem Kanalnetz der Stadt Esslingen stammt, wurde wiederum direkt aus der Esslinger Potenzialstudie (/15/) übernommen.

Die Fremdwasserabflüsse aus den verbleibenden Flächen, dem „Direkteinzugsgebiet“ des HKW Mühlhausen, wurden als Differenz der bekannten Fremdwasserzuflüsse zum ermittelten Fremdwasserabfluss auf dem HKW Mühlhausen berechnet und anschließend ebenfalls proportional zum (bekannten) Schmutzwasserabfluss innerhalb der Restfläche zugewiesen.

Der den einzelnen Strängen zugeordnete Trockenwetterabfluss ergab sich anschließend aus der Summe der berechneten Schmutz- und Fremdwasserabflüsse.

Durch die beschriebene Methodik gelang es, die dem HKW insgesamt zufließenden Trockenwetterabflüsse mit einem Fehler von nur 19 l/s (entsprechend 1,1 % der Gesamtmenge) den Strängen des Kanalnetzes zuzuweisen. Dieser ist angesichts der Tatsache, dass die Grundlagendaten aus unterschiedlichen Quellen stammen und teilweise unterschiedliche, zeitliche Bezüge haben, als sehr gering zu bewerten.

Zudem wurden evtl. Fehler in der Geocodierung der Schmutzwassermengen durch die „Eichung“ der Trockenwetterabflüsse an den fünf Messstellen und auf dem HKW Mühlhausen behoben.

6.1.2 Geometrische Kanaldaten

Der Kanaldurchmesser ist nur bei Einsatz von nachträglich eingebauten Wärmetauschern kritisch. Unterhalb eines Nenndurchmessers von 800 mm ist es in Rohrleitungen aufgrund der Unfallverhütungsvorschriften nicht möglich, Beschäftigte einzusetzen³.

Die geometrischen Kanaldaten (Nenndurchmesser), auf die sich die Energiekarte bezieht, wurden aus der Kanaldatenbank herausgefiltert, die vom Auftraggeber digital zur Verfügung gestellt wurde.

Das Gefälle wurde nicht bewertet, da es diesbezüglich schwer ist, eine allgemeingültige Aussage zu treffen: Einerseits sinkt bei größerem Gefälle die Gefahr von Ablagerungen. Andererseits ist bei niedrigerem Gefälle die Überströmung der Wärmetauscherfläche günstiger. Eine Bewertung des Gefälles sollte deswegen unserer Meinung nach in einer Machbarkeitsstudie jeweils für den konkreten Einbauort vorgenommen werden.

6.1.3 Abstand Wärmenutzer - Kanal

Der Abstand des Wärmenutzers vom Kanal beeinflusst vor allem über die Trassenpreise die Wirtschaftlichkeit. Wärmeverluste können in aller Regel vernachlässigt werden, da der Kreislauf zwi-

³ Gemäß GUV-V C22 (§ 73) dürfen Beschäftigte in Rohrleitungen mit einem Lichtmaß von weniger als 600 mm nicht eingesetzt werden.

schen Wärmetauscher (Kanal) und Wärmepumpe (Nutzer) der Sekundärkreislauf ist, dessen Temperaturniveau sich nicht stark von dem des umgebenden Bodens unterscheidet.

Die Literaturangaben zum wirtschaftlich vertretbaren Abstand zwischen Wärmenutzer und Kanal schwanken zwischen 100 und 200 m, weswegen wir einen Abstand von 150 m in der Energiekarte eingetragen haben. Hinzugefügt haben wir zusätzlich einen Abstand von 300 m, da unserer Einschätzung nach die Bedeutung des Trassenpreises etwas überschätzt wird: Dieser kann z.B. – je nach konkreter Umgebung - durch moderne Bauverfahren oder die Nutzung bestehender Seitenstränge deutlich gesenkt werden. Unter günstigen Voraussetzungen sind sicherlich auch Distanzen von 500 m wirtschaftlich überbrückbar.

6.1.4 Fernwärmenetz EnBW

Ein Übersichtslageplan des Fernwärmenetzes der EnBW in Stuttgart wurde vom AG in digitaler Form besorgt und in den betroffenen Energiekarten abgebildet.

6.1.5 Vorhandene und Potenzielle Wärmenutzer

Abschließend wurden in die Energiekarte vorhandene bzw. potenzielle Abnehmer für Wärme aus Abwasser eingetragen:

- Für das „Seelberg-Wohnen“ – Areal (ehemaliges „Terrot-Areal“, Wildunger Straße, Bad Cannstatt) wurden Wärmetauscher bereits im Kanal installiert, im Neubau des Innenministeriums (Willy-Brandt-Straße, Stuttgart Mitte) ist eine Anlage im Bypass vorgesehen.
- Das Amt für Umweltschutz der Stadt Stuttgart stellte eine Liste mit den Wärmeverbräuchen der Liegenschaften der Stadtverwaltung zur Verfügung, aus dieser wurden diejenigen Objekte mit einem Wärmeverbrauch von über 125.000 kWh/a ausgewählt (Stichjahr: 2008). Aus einer weiteren Liste desselben Amtes wurden eine Auswahl möglicherweise interessanter Bauflächen entnommen. Sämtliche Objekte wurden über die Adressierung verortet und in die Energiekarte eingetragen.

6.2 Erläuterung der Legenden

Als prinzipiell nutzbar gelten alle Haltungen, die einen mittleren Trockenwetterabfluss von mehr als 15 l/s aufweisen (s.o.). Es erfolgte dann eine weitere Bewertung, der die Profilhöhe ($> \text{DN } 800$) zugrunde gelegt wurde. Die Haltungen wurden so als „ohne“ bzw. „mit Einschränkung“ nutzbar klassifiziert. Eine Abwasserwärmenutzungsanlage im Bypass wäre aber somit in jedem Fall möglich.

Da die Leistung, die man in Form von Wärme dem Abwasser entzieht, nicht nur vom Abwasservolumenstrom abhängt, sondern auch von der Temperaturdifferenz, um die man diesen Volumenstrom abkühlt, ist in der Energiekarte keine absolute, entziehbare Wärmeleistung angegeben. Vielmehr ist – über die Strichstärke der Haltungen – die spezifische Wärmeleistung je Kelvin Abkühlung in kW/K angegeben. Dabei wurde eine Klassifizierung in die Bereiche „kleiner 150 kW/K “, „150 bis 400 kW/K “ und „größer 400 kW/K “ vorgenommen. Die Wahl der Klassen wurde so vorgenommen, dass die Summe der Längen der Haltungen in jeder Klasse annähernd identisch ist.

7 BESCHREIBUNG DER ERGEBNISSE

7.1 Statistische Auswertung

Von allen Haltungen des Kanalnetzes der Stadt Stuttgart kommen 7 % für eine Abwasserwärmenutzung in Frage. Dieser Wert ist bezogen auf die Länge der Haltungen, für die eine Abwasserhaltung grundsätzlich sinnvoll ist: die der Schmutz- und Mischwasserkanäle. Die Klasse „geeignet ohne Einschränkungen“ (Querschnitt größer DN 800) überwiegt dabei mit 88 % der relevanten Haltungen die Klasse „geeignet mit Einschränkungen“ bei weitem (Tabelle 1).

Tab. 1: Statistische Auswertung der Ergebnisse der Energiekarten

Länge aller Haltungen der Stadt Stuttgart [km]	Länge aller in Frage kommender Haltungen [km, -]	Länge der Haltungen ohne Einschränkungen [km]
1.683,53	110,96 (7 %)	98,07

Die Stärke der Energiekarte lässt sich jedoch nicht in Zahlen ausdrücken. Sie liegt vielmehr in der grafischen Verknüpfung der relevanten Haltungen, der um diese gelegenen, für eine Abwasserwärmenutzung interessanten Umgebungen und der örtlichen Ausweisung der für die Abwasserwärmenutzung infrage kommenden, kommunalen Objekte.

7.2 Qualitative Auswertung

Eine grafisch/qualitative Auswertung der Energiekarten zeigt zunächst einmal, dass beide Objekte, für die eine Abwasserwärmenutzung bereits umgesetzt wurde bzw. kurz vor der Umsetzung steht⁴, im Nahbereich („grüner“ Bereich, bis maximal 150 m vom Kanal entfernt) von Kanälen liegen, die ein sehr großes Entzugspotenzial aufweisen (jeweils > 400 kW/K). Dieses Ergebnis war auch so erwartet worden.

⁴ Seelberg Wohnen und Neubau Innenministerium, siehe Kapitel 6.1.5

Ähnlich positiv ist das Ergebnis für zwei Objekte, zu denen seitens der Stadtverwaltung Abwasserwärmenutzungsanlagen (z.B. im Rahmen von Machbarkeitsstudien) näher untersucht werden: Der ehemalige Güterbahnhof Bad Cannstatt (zukünftig: „Neckarpark“) sowie das Zentrum für Innere Medizin des Katharinenhospitals. Letzteres liegt auch innerhalb eines Bereichs, für den aus einer Messkampagne im Kanal bekannt ist, dass das Abwasser dort eine sehr hohe Temperatur hat, was für die Abwasserwärmenutzung vorteilhaft ist.

Die Energiekarten zeigen darüber hinaus, dass es sowohl im Bereich der stadteigenen Liegenschaften, als auch bei den Bauflächen sehr viele Objekte gibt, die in der Nähe von Kanälen liegen, die ein Potenzial zur Abwasserwärmenutzung aufweisen. Die Zahl der Objekte ist dabei so groß, dass eine Auflistung keinen Zugewinn an Information bedeuten würde. Zielführend wäre es aus Sicht der Autoren vielmehr, die Energiekarte zukünftig bei jedem größeren Bauvorhaben bzw. vor der Erneuerung jeder größerer Heizungsanlage (in städtischen Liegenschaften) heranzuziehen und das Potenzial einer Abwasserwärmenutzungsanlage mit einem Blick abzuschätzen.

Ein zusätzlicher Aspekt dürfte dabei zunehmend in das Blickfeld geraten: Die Beeinflussung einer bestehenden Anlage zur Abwasserwärmenutzung durch eine neue, im Einzugsgebiet der bestehenden Anlage angesiedelte Abwasserwärmenutzungsanlage (bzw. umgekehrt). Dies war auch der Hintergrund der Entscheidung, die bestehenden Anlagen zur Abwasserwärmenutzung in die Energiekarten aufzunehmen.

Sollte die Versorgung des „Neckarparks“ (Bad Cannstatt) realisiert werden, so ist der Hauptsammler „Rechts des Neckars“ damit sicherlich energetisch erschöpft (auch die Anlage des „Seelberg-Wohnens“ befindet sich an diesem Sammler). Vollständig ungenutzt ist bislang das Potenzial der Hauptsammler „Feuerbach“ sowie „Links des Neckars“. Es ist zu empfehlen, bei der strategischen Suche nach möglichen weiteren Standorten diesen Hauptsammlern besonderes Augenmerk zu widmen.

8 AUSWERTUNG DER TEMPERATURDATEN

8.1 Auswertung der Einzeldaten der Klärwerke

Vom Auftraggeber wurden die mittleren Temperaturwerte (Tageswerte) der Abwassertemperatur im Belebungsbecken aller Klärwerke für die Jahre 2004 bis 2009 zur Verfügung gestellt. Diese Daten wurden von uns ausgewertet.

Im ersten Schritt wurden die Temperaturen (auf der y-Achse) über den Tagen des Jahres (auf der x-Achse) aufgetragen. Diese Art der Darstellung dient im Wesentlichen dazu, die Daten auf Plausibilität zu prüfen: Ausreißer, das Fehlen von Messwerten oder offensichtliche Fehlmessungen lassen sich in diesem Diagramm schnell erkennen. Der „typische“ Jahresverlauf, den jede Kläranlage aufweist, wird ebenfalls schnell offenbar. Abbildung 15 zeigt die Grafik nach Elimination von fehlenden Messwerten (Nullwerten) für das Klärwerk Plieningen.

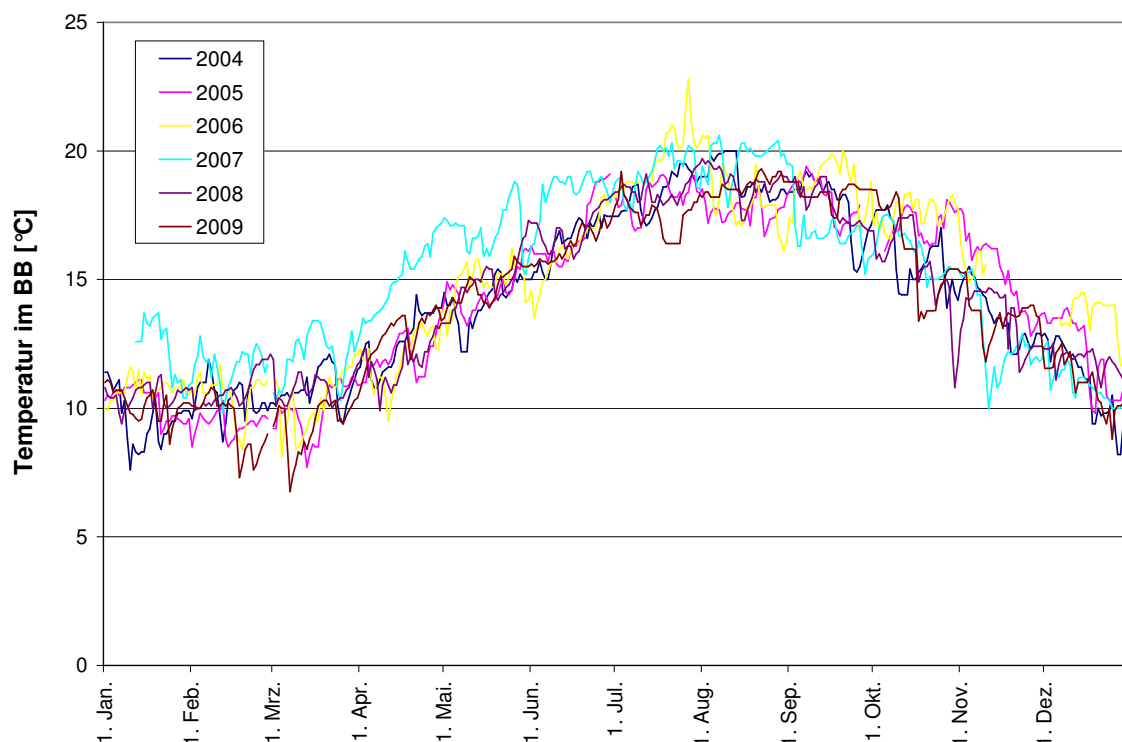


Abb. 15: Abwassertemperaturen im Belebungsbecken des Klärwerks Plieningen (Jahre 2004 bis 2009)

Vor einen Vergleich mit anderen Kläranlagen oder anderen Messorten müssen die Daten jedoch noch weiter aggregiert werden, da eine Übersicht sonst aufgrund der Fülle der Punkte schwer möglich wäre. Aus diesem Grund wurden die Daten, die in Abbildung 15 dargestellt sind, auch in ein Diagramm der Unterschreitungshäufigkeiten überführt, wie es Abbildung 16 für alle vier Klärwerke zeigt. Für jede beliebige Temperatur im Belebungsbecken jeder der Klärwerke kann in diesem Diagramm die Häufigkeit, mit der diese Temperatur unterschritten wird, abgelesen werden. Der Wert 100 % entspricht somit allen 365 Tagen im Jahr.

Die auffällige „Stufenform“ der Kurve des Klärwerks Möhringen resultiert aus der Besonderheit, dass die Temperaturwerte in diesem Klärwerk erst seit dem 01.04.2008 mit Nachkommastelle gemessen/gespeichert wurden.

Auffallend ist darüber hinaus der große Temperaturunterschied zwischen dem Abwasser im Belebungsbecken des HKW Mühlhausen im Vergleich zu den drei anderen Klärwerken. Die Gründe können – ohne eine nähere Untersuchung – nur vermutet werden. Weitere Hinweise ergeben sich jedoch in den folgenden Kapiteln.

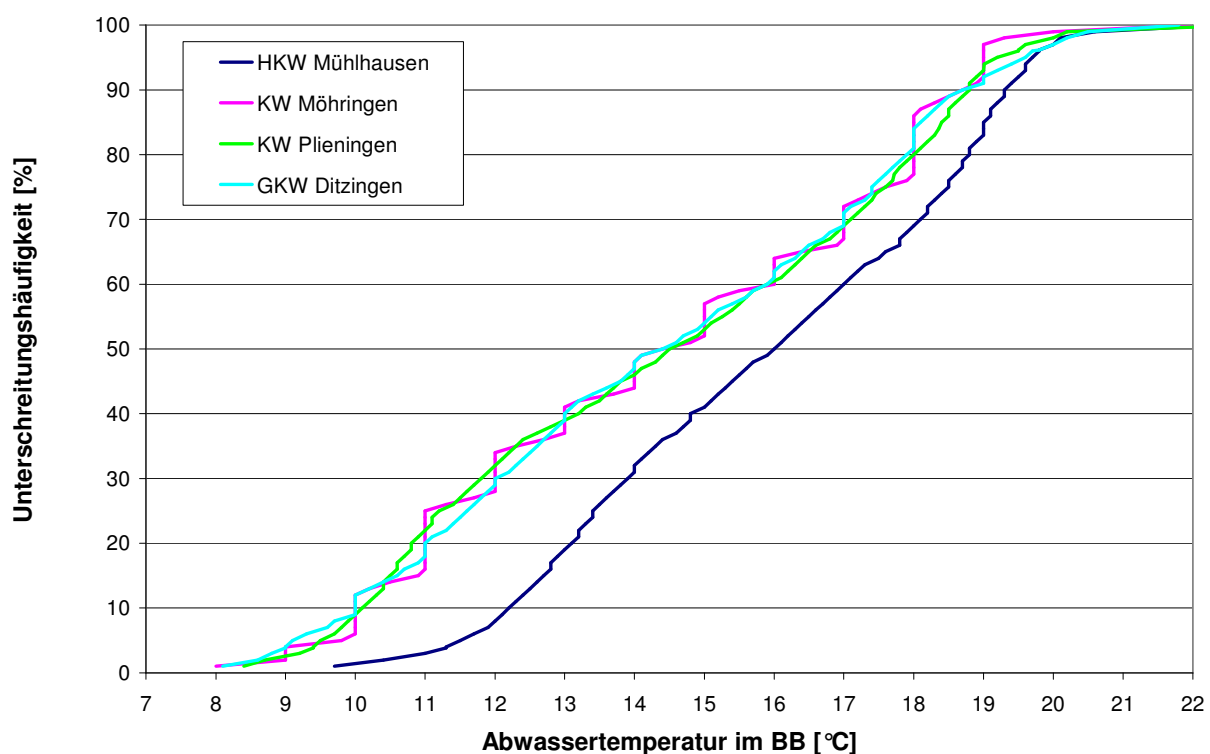


Abb. 16: Unterschreitungshäufigkeiten der Abwassertemperaturen im Belebungsbecken der vier Stuttgarter Klärwerke (Bezugszeitraum: Jahre 2004 bis 2009)

8.2 Vergleich der Ergebnisse mit anderen Kläranlagen

Interessant ist darüber hinaus ein Vergleich der erstellten Kurven der Unterschreitungshäufigkeiten mit den entsprechenden Kurven von anderen Klärwerken aus ganz Baden-Württemberg. Diesen Vergleich zeigt die folgende Abbildung 17.

Es zeigt sich, dass die Klärwerke Möhringen, Plieningen und das Gruppenklärwerk Ditzingen bezüglich den Abwassertemperaturen insgesamt im „Mittelfeld“ aller 20 in Baden-Württemberg untersuchten Klärwerke liegen. Das HKW Mühlhausen hingegen hat nicht nur höhere Temperaturen als die drei anderen Stuttgarter Klärwerke, sondern es gibt (im Winter) überhaupt nur ein Klärwerk, das höhere Temperaturen aufweist.

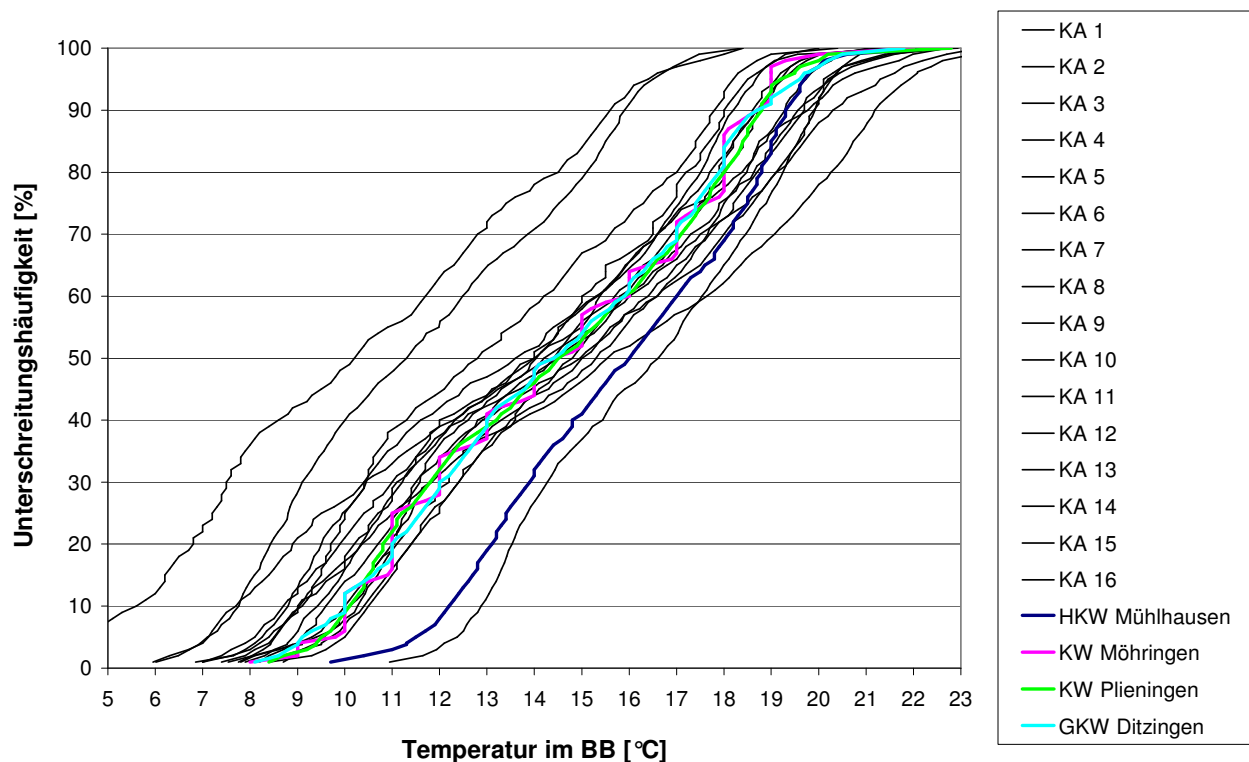


Abb. 17: Unterschreitungshäufigkeiten der Abwassertemperaturen auf den Stuttgarter Klärwerken im Vergleich mit anderen Klärwerken aus Baden-Württemberg

8.3 Auswertung der Temperaturmessungen im Kanal

In der vorliegenden Studie ergab sich zudem die seltene Gelegenheit, die Abwassertemperaturen nicht nur kläranlagenspezifisch auszuwerten, sondern auch differenziert innerhalb des Einzugsgebietes einer Kläranlage. Basis für diese Auswertung waren die Messdaten der fünf Abflussmessstellen, an denen auch die jeweilige Abwassertemperatur mitgeloggt wurde.

Für diese Messstellen wurde zunächst für jeden Tag der Messkampagne ein abflussgewichteter Tagesmittelwert der Abwassertemperatur gebildet. Diese Werte wurden über der Abwassertemperatur im Belebungsbecken des HKW Mühlhausen vom selben Tag aufgetragen (s. Abbildung 18). Unter Ansatz eines linearen Zusammenhangs wurde aus diesen Daten eine Regressionskurve abgeleitet.

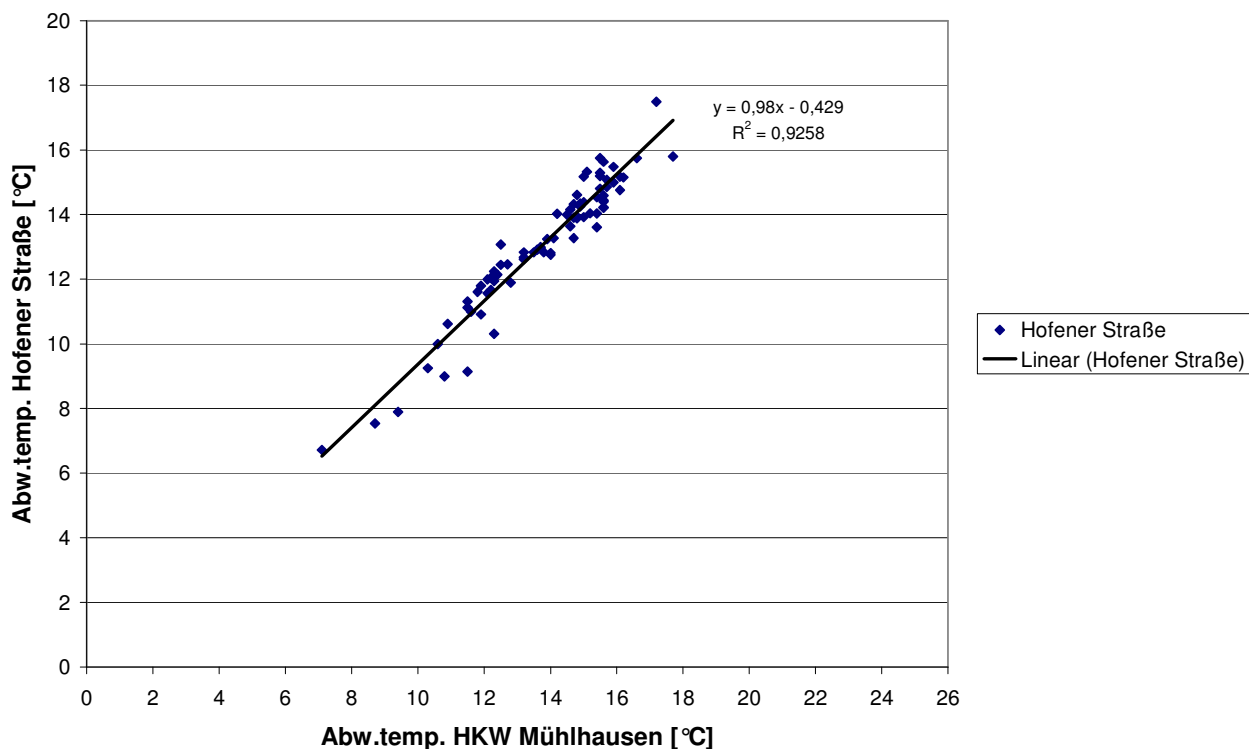


Abb. 18: Abflussgewichtete Tagesmittel der Abwassertemperatur an der Messstelle Hofener Straße über der Abwassertemperatur im Belebungsbecken des HKW Mühlhausen und die daraus ermittelte Regressionsgerade

Die genannten Regressionsgraden aller fünf Messstellen sind in Abbildung 19 zusammengestellt. In der Legende sind auch die Bestimmtheitsmaße der verschiedenen Kurven gezeigt. Diese nehmen einen großen Wertebereich von nur 0,491 (Kriegsbergstraße) bis zu einem guten Wert von 0,926 (Hofener Straße) ein. Die Auswertung hat weiterhin eine etwas eingeschränkte Aussagekraft, weil die Anzahl der Messtage (und der Wertebereich, der von den Messungen erfasst wurde) sehr unterschiedlich ist. So wurde in der Daimlerstraße nur 30 Tage lang gemessen, die berechneten Tagesmitteltemperaturen umfassen einen Wertebereich von weniger als 3 °C. Am Neckartor wurde hingegen 180 Tage lang gemessen und eine Spanne der Abwassertemperatur von über 12 °C erfasst.

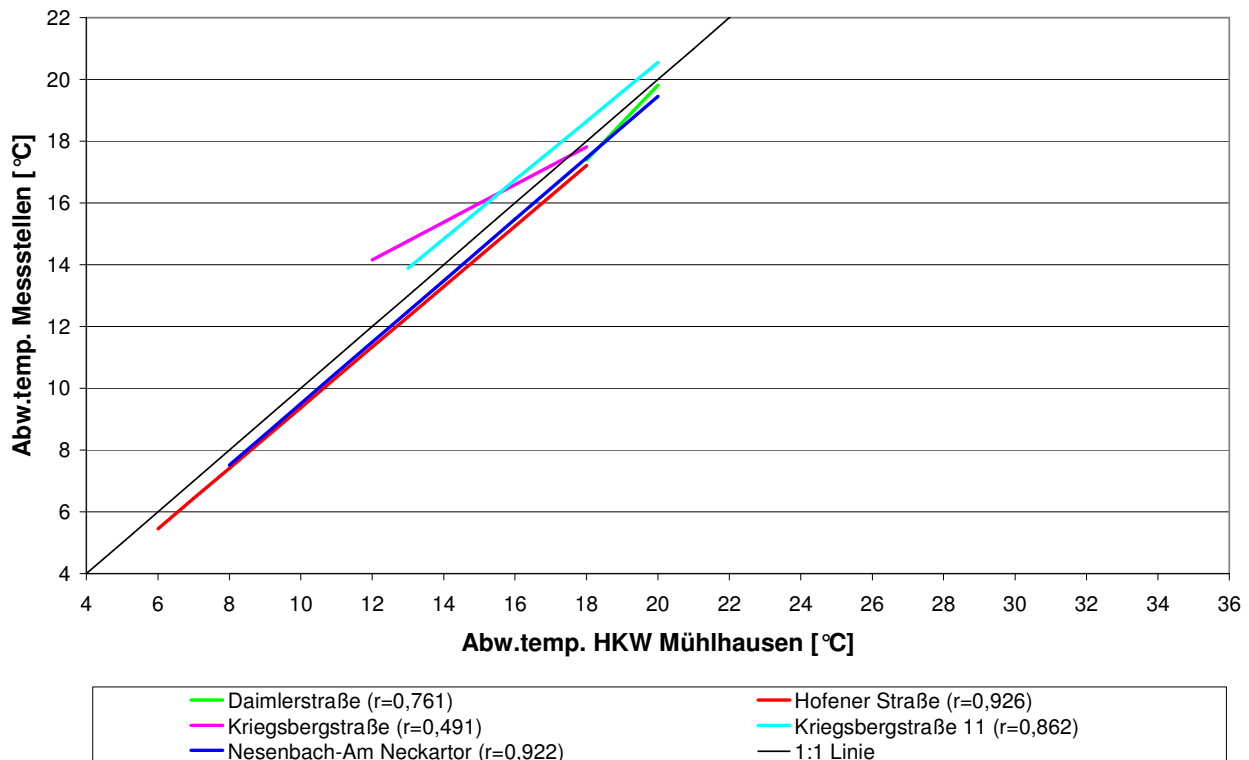


Abb. 19: Regressionsgeraden des abflussgewichteten Tagesmittels der Abwassertemperatur an den fünf Messstellen über der Abwassertemperatur im Belebungsbecken des HKW Mühlhausen

Bei der Analyse der Daten fällt zunächst einmal auf, dass die größten Bestimmtheitsmaße von den Messstellen erreicht werden, die ein sehr großes Einzugsgebiet aufweisen (und für die eine hohe Anzahl an Messtagen vorliegen). Dies ist die Messstelle Hofener Straße und Nesenbach-Am Neckartor. Dies ist auch plausibel, da sich die Abwassertemperaturen an einem Punkt im Kanalnetz tendenziell denen auf der Kläranlage immer weiter angleichen, je größer der Teilstrom ist, der über diesen Punkt fließt.

Zugleich liegen die Regressionsgeraden dieser Messstellen aber unterhalb der Winkelhalbierenden. Die absoluten Temperaturen sind also an diesen Messstellen eher etwas kälter als auf der Kläranlage. Dies ist nach der Erfahrung der Autoren unüblich: Normalerweise ist das Abwasser – zumindest im Winter – im Belebungsbecken der Kläranlage kälter, da es dort über die freie Oberfläche zur Atmosphäre Wärme verliert. Eine gute Erklärung für dieses Phänomen ist der Zuckerbergstollen, der im Winter die Temperatur des Abwassers anheben könnte. Dies würde auch die beobachtete, sehr hohe Abwassertemperatur auf dem HKW Mühlhausen im Vergleich zu anderen Klärwerken in Baden-Württemberg erklären (vgl. Abbildung 17).

Die Temperaturverhältnisse in der Daimlerstraße sind wiederum ähnlich wie in der Hofener Straße, was nur plausibel ist angesichts der Tatsache, dass ein Großteil des Abflusses an der Hofener Straße zuvor die Daimlerstraße passiert hat.

Auffällig ist schließlich auch noch, dass die Temperaturen an den Messstellen Kriegsbergstraße und Kriegsbergstraße 11 noch höher sind, als auf dem HKW. Und dies, obwohl die Temperaturen dort bereits im Vergleich zum Rest von Baden-Württemberg sehr hoch sind (s.o.).

Dieser Befund unterstützt die allgemeine Einschätzung der Autoren, dass hohe Abwassertemperaturen dort zu erwarten sind, wo eine hochverdichtete Bebauung mit einem hohen Schmutzwasseranfall einhergeht. Transportsammler über unbebautes Gebiet (versiegelt oder unversiegelt) scheinen hingegen eher zu einer Abkühlung des Abwassers zu führen.

Angesichts der Vielzahl an Rahmenbedingungen, die für eine gelungene Anlage zur Abwasserwärmenutzung gegeben sein müssen, sollte der Faktor „Verlauf der Abwassertemperatur innerhalb des Kanalnetzes“ nicht überbewertet werden. Hochinteressant und als „Leitgedanke“ nicht zu unterschlagen ist die Erkenntnis trotzdem, dass die idealen Bedingungen für die Abwasserwärmenutzung nicht unbedingt dort vorliegen, wo eine möglichst große Abwassermenge vorhanden ist, sondern unterhalb der Kerngebiete, die dicht besiedelt sind und eine hohe Schmutzwasserabflussspende besitzen.

Klinger und Partner
Ingenieurbüro für Bauwesen und Umwelttechnik GmbH

Friolzheimer Straße 3 · 70499 Stuttgart
Telefon: 0711 693308-0 · Telefax: 0711 693308-99
E-Mail: info@klinger-partner.de
Internet: <http://www.klinger-partner.de>

Aufgestellt:
Dr.-Ing. Jan Butz

Stuttgart, den 24.08.2011
ID-01043 hg/jb/jb

i. A.



Dr. Jan Butz
Projektleiter



Horst Klinger
Geschäftsführer

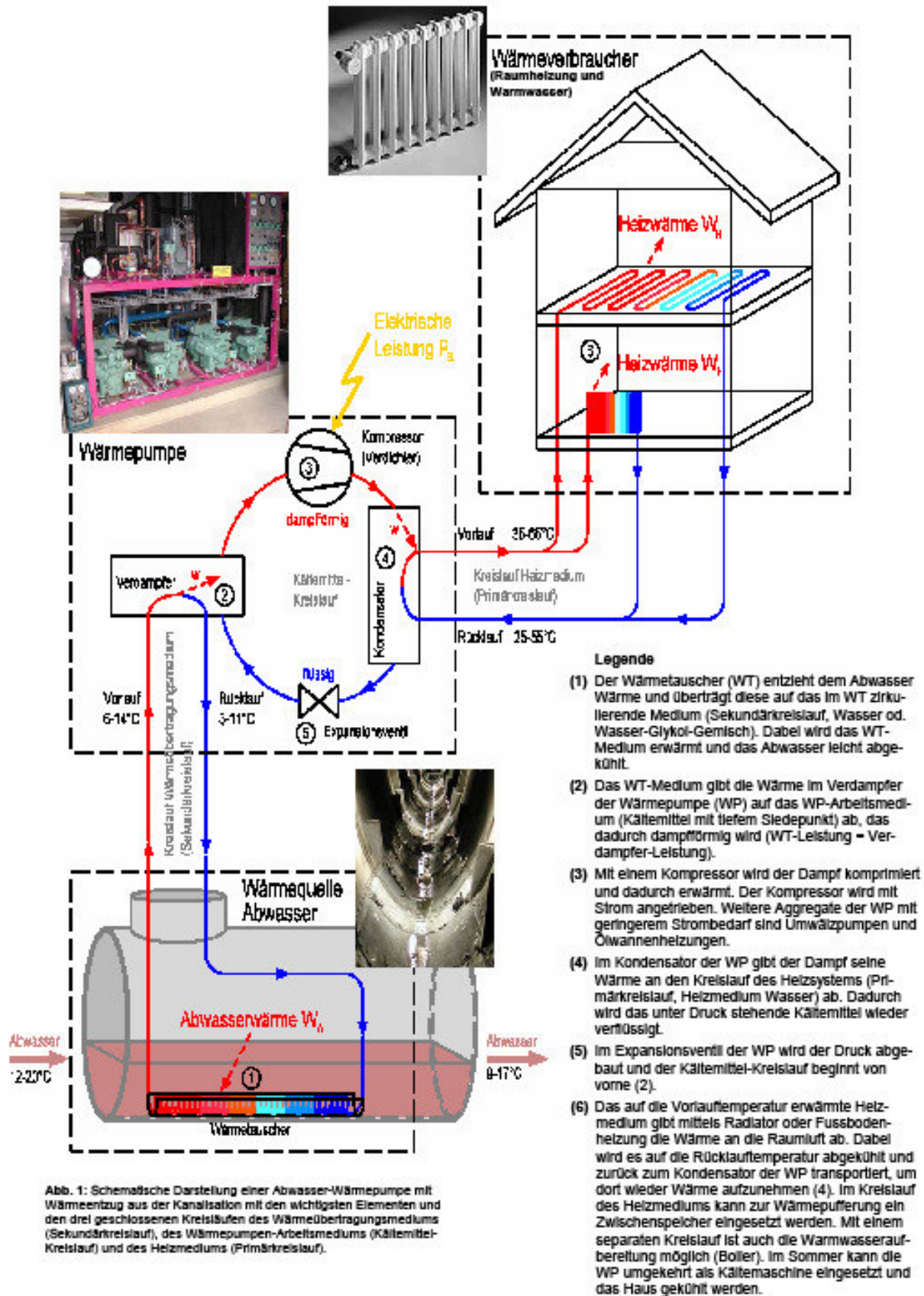
LITERATURVERZEICHNIS

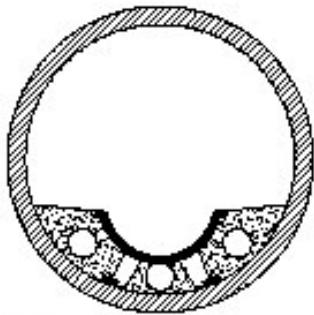
- /1/ Buri, R., & Kobel, B.: Energie aus Abwasser – Leitfaden für Ingenieure und Planer. Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Osnabrück, Bern 2005
- /2/ Wärmetauscher im Kanal - Theoretische Grundlagen, Klinger, H., & Weber, KA Abwasser Abfall, 51(6), 2004, S. 608 - 612
- /3/ Heizen und Kühlen mit Abwasser. Ratgeber für Bauherrschaften und Gemeinden. Hrsg.: EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie, Bern, Schweiz
- /4/ Heizen und Kühlen mit Abwasser – Ratgeber für Bauherren und Kommunen. Hrsg.: Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V., Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Arbeitsgemeinschaft für sparsame Energie- und Wasserverwendung (ASEW) GbR im Verband kommunaler Unternehmen, Institut Energie in Infrastrukturanlagen. München, Osnabrück 2005
- /5/ Faist Emmenegger, M., & Frischknecht, R. (2005): Ökobilanz einer Wärmepumpe mit Abwärmenutzung aus Rohabwasser. ESU-service, Uster (CH). Schlussbericht im Auftrag des Amtes für Hochbauten der Stadt Zürich, 13. Dezember 2005
- /6/ Zimmermann, M. (2006): Was beantworten Umweltanalysen? - Die Sicht eines Anwenders. Tagungsband des 14. Schweizerischen Status-Seminars Energie- und Umweltforschung im Bauwesen 7./8. September 2006 ETH Zürich. S. 41 – 48
- /7/ Burger, H., & Meier-Wiechert, G. (2005): Wärmepumpen zum Heizen und Kühlen. BHKS-Almanach 2005. S. 21 - 28
- /8/ Studer, U.: Rabtherm - Abwasser, die ungenutzte Wärmequelle. Information der Firma Rabtherm.
- /9/ DWA M 114 „Energie aus Abwasser. Wärme- und Lageenergie“. DWA, Hennef, Juni 2009
- /10/ Müller, E.A., & Butz, J. (2010): Abwasserwärmenutzung in Deutschland – Aktueller Stand und Ausblick. KA – Korrespondenz Abwasser, Abfall 57(5), S. 437 – 442
- /11/ Anpassung einer Software zur Simulation der Abwassertemperatur auf Baden-Württembergische Verhältnisse und Anschubfinanzierung zur Reaktivierung eines bestehenden Abwasserwärmetauschers, Forschungsprojekt der Universität Stuttgart (Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft), des Ingenieurbüros Klinger und Partner GmbH (Stuttgart) und des Steinbeis-Transferzentrum Technische Beratung an der Hochschule Esslingen, Förderung durch das Umweltministerium Baden-Württemberg

- /12/ Schmutzfrachtberechnung für den Stadtbezirk Stuttgart Weilimdorf (Entwurf). Dahlem Beratende Ingenieure GmbH, Darmstadt, März 2010
- /13/ Schmutzfrachtberechnung Feuerbachtal (Vorabzug). Dahlem Beratende Ingenieure GmbH, Darmstadt, Oktober 2009
- /14/ Schmutzfrachtberechnung mittels Langzeitsimulation im Einzugsgebiet der Klärwerke Stuttgart-Möhringen und Stuttgart-Plieningen. InfraConsult, Stuttgart, Dezember 2009
- /15/ Potenzialstudie Abwasserwärmenutzung (Stufe 1 – ohne hydraulische Auslastung der Kanäle (Stadtwerke Esslingen am Neckar GmbH & Co. KG), Ingenieurbüro Klinger und Partner GmbH, Stuttgart, Stand 08.10.2010

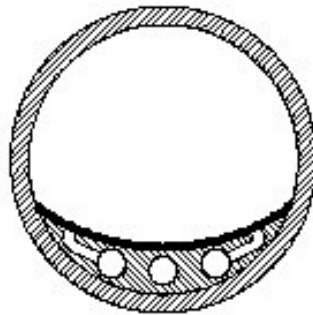
ANHANG

- 1 Schemadarstellung einer Anlage zur Abwasserwärmenutzung (aus: /1/)
- 2 Skizzen von Ausführungsarten nachträglich eingebauter Wärmetauscher
(aus: /8/)
- 3 Vertragsentwurf (aus: /9/)





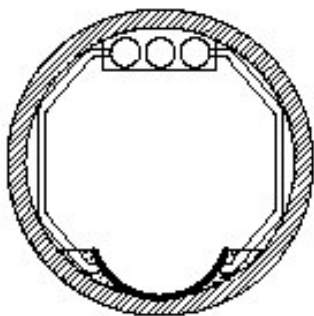
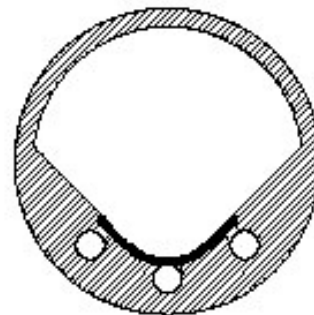
Zürich-Wipkingen



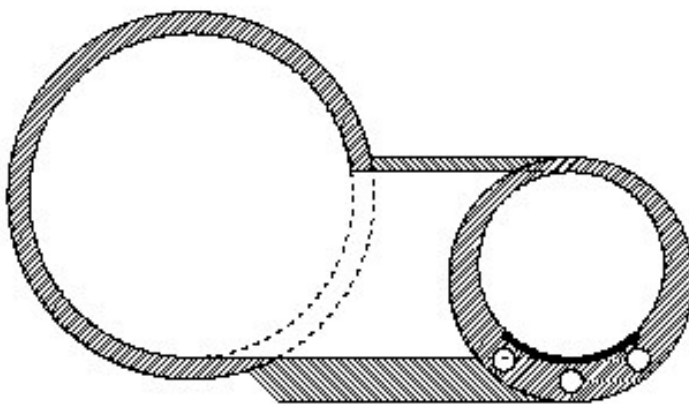
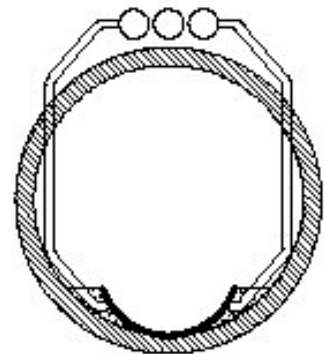
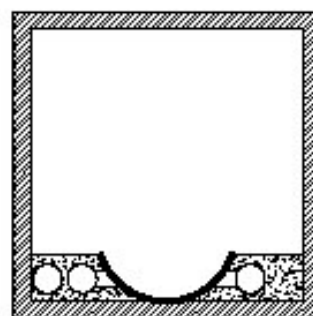
Singen D



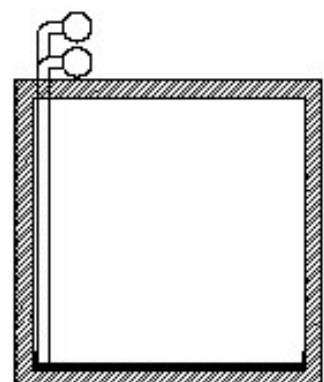
Leverkusen D



Maierried Wülflingen



Kanal mit Rabtherm-Bypass Wülflingen



Zwingen

VEREINBARUNG ÜBER DIE ABWASSERWÄRMENUTZUNG

- Entwurf -

zwischen

Kanalbetreiber Musterstadt (*Kanal GmbH*)
Hauptstraße, 12345 Musterstadt
(Eigentümer und Betreiber Kanalnetz)

und

Wärmeversorgung aus Abwasser AG (*Wärme AG*)
Kanalgasse, 12345 Musterstadt
(Wärmenutzer)

1 Zweck der Vereinbarung

Die Vereinbarung regelt die Bedingungen und Anforderungen, die sich aus Bau und Betrieb der Abwasserenergie-nutzungs-anlage ergeben.

2 Grundsätze

- (1) Der für den Einbau der Abwärmenutzung vorgesehene Abwasserkanal ist und bleibt Eigentum der *Kanal GmbH*.
- (2) *Kanal GmbH* stellt *Wärme AG* den Kanalabschnitt vom Schacht bis Schacht (*Eiprofil 1600 mm*) zum Einbau und Betrieb der Abwasserwärmenutzung (Wärmetauscher-Elemente und Verrohrung) zur Verfügung. Das Kanalteilstück wird ohne Zeitbeschränkung zur Nutzung zur Verfügung gestellt.
- (3) *Kanal GmbH* gewährt *Wärme AG* und ihren zuständigen Mitarbeitern für Errichtung, Betrieb und Instandhaltung der Wärmetauscherelemente und des Rohrsystems jederzeit Zugang zum Abwasserkanal, jedoch nach Rücksprache mit der *Kanal GmbH*.
- (4) Die verlegten Wärmetauscher-Elemente (WT-Elemente) sind im Kanal geduldet. Alle notwendigen Aufwendungen, die der *Kanal GmbH* im Betrieb und Unterhalt der Abwasserleitung durch die WT-Elemente entstehen (Verlegen bei Reparaturen oder Ersatz der Leitung etc.) gehen zu Lasten der *Wärme AG*. Wegen Außerbetriebnahme der Kanalisation oder Änderung der Funktionsweise des Kanals können gegenüber *Kanal GmbH* keine Entschädigungsansprüche geltend gemacht werden.
- (5) Die WT-Elemente bleiben in Eigentum und Verantwortung der *Wärme AG*. Die *Wärme AG* kommt für alle Kosten aus Bau, Betrieb und späterer Demontage der Einbauten auf. Bei definitiver Außerbetriebnahme aus wirtschaft-lichen oder techni-schen Gründen sind alle Einbauten im Kanal binnen angemessener Frist zu demontieren.
- (6) Der *Wärme AG* verpflichtet sich, bei einem Eigentums- oder Nutzerwechsel diese Vereinbarung an Dritte zu übertragen und den Eigentümer-/Nutzerwechsel der *Kanal GmbH* anzuzeigen unter Beifügung der Anerkennung dieser Vereinbarung durch den Dritten.

3 Haftung

- (1) Die Haftung für Bau und Unterhalt der WT-Anlage liegt bei der *Wärme AG*, ebenso bei Schäden durch Dritte, wenn diese nicht Dritten nachgewiesen werden können.
- (2) Die *Kanal GmbH* haften nicht für Schäden, die aufgrund der Abwasserzusammensetzung, der Abwassermenge und der Kanalreinigung (Spülungen) entstehen.

4 Spezielle Anforderungen

- (1) Die Einbauarbeiten werden von der *Kanal GmbH* begleitet und abgenommen. Die Detailpläne der Maßnahmen, die den Kanal betreffen, sind der *Kanal GmbH* vor Baubeginn zur Genehmigung zuzustellen.
- (2) Alle Teile im Kanal sind in Kunststoff oder rostfreiem Chromstahl auszuführen.
- (3) Ohne Zustimmung der *Kanal GmbH* dürfen keine weiteren Einbauten erfolgen.
- (4) Der Kanal kann voll gefüllt sein. Die Kanalisation wird zudem regelmässig mit Wasserhochdruck gespült. Die Konstruktion und die Halterungen der WT-Elemente sind dementsprechend auszulegen.
- (5) Die Funktionsfähigkeit der Kanalisation muss garantiert bleiben. Es dürfen keine Hindernisse eingebaut werden, an denen Faserstoffe, Textilien oder sonstige Teile hängen bleiben oder die den Abflussquerschnitt stark redu-zieren. Ebenfalls dürfen sich beim Spülen des Kanals der Spülschlauch und die Hochdruckdüse nicht verklemmen.
- (6) Der Kanalzugang über die bestehenden Schächte muss gewährleistet bleiben.
- (7) Spätere Instandsetzungsarbeiten am Kanalnetz müssen ausführbar sein (die bekannten Schäden am Kanal werden zu Lasten der *Kanal GmbH* vorgängig saniert).
- (8) Der nachträgliche Einbau von Stützen für Hausanschlüsse muss möglich sein.
- (9) Die *Kanal GmbH* ist immer vorgängig zu informieren, wenn Wartungsarbeiten an der Wärmenutzungsanlage im Kanal ausgeführt werden müssen.
- (10) Die Sicherheits- und Schutzmassnahmen für die Arbeiten im Kanal sind zu beachten.
- (11) Über den Einbau der WT-Anlage wird durch die *Wärme AG* eine Fotodokumentation erstellt.

5 Gerichtsstand

- (1) Gerichtsstand ist *Musterstadt*.

Für den Wärmenutzer (*Wärme AG*)

Für den Kanaleigentümer und -betreiber (*Kanal GmbH*)

....., den
Ort und Datum

.....
Stempel und Unterschrift

....., den
Ort und Datum

.....
Stempel und Unterschrift