

Evaluation von Technik, Betrieb und Randbedingungen Potenzial der Kanalwärmenutzung in Freiburg im Breisgau

Schlussbericht

Projektträger	badenova AG & Co. KG Tullastraße 61 D 79108 Freiburg i.Br.
Projektbearbeitung	Burkard Hagspiel badenova AG & Co. KG, Unternehmensbereich PROduktion
Gutachter	Studer + Partner AG Dennlerstrasse 41 CH 8047 Zürich Beller Consult GmbH Linnéstraße 5 D 79037 Freiburg i.Br. planerwerkstatt Hölken-Berghoff Reutener Straße 19 D 79279 Vörstetten
Zusammengefasstes Ergebnis	<p>Neben gewerblichen und industriellen Betrieben erzeugen die privaten Haushalte von Freiburg durch deren Warmwasserbereitung eine Erwärmung des Abwassers auf durchschnittlich ca. 15 °C. Diese Abwärme kann durch Einbau von Wärmetauschern in das vorhandene Kanalnetz unter günstigen Randbedingungen für die Grundwärmeversorgung größerer Gebäude wirtschaftlich genutzt werden.</p> <p>Aus 1 m³ Abwasser werden mit konventionellen Wärmepumpen bei einer Arbeitszahl von durchschnittlich 4-5 ca. 2,3 kW Sekundärenergie (Wärme und Kälte) erzeugt.</p> <p>Die Technik ist umfänglich untersucht und nach anfänglichen Schwierigkeiten jetzt ausgereift. Die Funktionstauglichkeit wie Haltbarkeit ist an einigen in Betrieb befindlichen Anlagen nachgewiesen.</p> <p>Die Projektierung einer Anlage ist in Freiburg an bis zu 20 Einzelstandorten denkbar. Baugebiete mit zentraler Versorgung eignen sich ebenso. Theoretisch können bis zu 2% des Primärenergiebedarfs von Freiburg durch Entzug der Kanalwärme gedeckt werden. Es besteht darüber hinaus in Kombination des Anlagenbetriebes in ähnlicher Weise Potenzial zur Deckung des sommerlichen Kältebedarfs.</p> <p>Nach dem Prinzip der Wärmepumpe werden gegenüber konventionellen Heizungsanlagen bis über 30% des Primärenergiebedarfs ressourcenschonend und klimaneutral eingespart. Durch den Entzug von Abwasser- und Bodenwärme wird darüber hinaus ein ökologischer Beitrag zum Grund- und Fließgewässerschutz geleistet.</p> <p>Die Wärmerückgewinnung ist unter den vertraglich möglichen Bedingungen von badenova im Portefeuille des Leistungsangebotes denkbar. Es steht in Aussicht, dass bestehende anlagentechnische und betriebliche Vorbehalte ausgeräumt werden können.</p> <p>Die Technik steht in Freiburg jedoch wirtschaftlich im Wettbewerb mit vergleichbaren, bereits etablierten Wärmeanlagen wie BHKW und mit bestehenden Fernwärmenetzen. Mit einem Vollkostenpreis für Wärme ab ca. 55 EUR/MWh ist die Technik derzeit unter Normalbedingungen für badenova noch nicht wirtschaftlich. Das steht jedoch in naher Aussicht.</p>
Zusammengestellt von	B. Hagspiel Freiburg im Breisgau August 2007



Inhaltsverzeichnis

A	Einleitung	1
1	Untersuchungsziel	2
2	Ansätze zur Evaluation der Kanalwärmenutzung	2
3	Durchgeführte Untersuchungen	3
B	Funktionsweise und Technik	4
1	Wärme und Kälteangebot im Abwasser	4
2	Kanalwärmetauscher	9
3	Wärmetransportleitungen	13
4	Wärmepumpe	14
5	Gebäudeheizungstechnik, Brauchwassererzeugung	16
C	Rahmenbedingungen	18
1	Abwasseranlagenbetrieb	18
2	Wärmeanlagenbetrieb	20
3	Nutzung Synergien	21
D	Ökologische Bewertung	23
E	Wirtschaftlichkeit	26
1	Größe der Anlage	28
2	Anlagenausbau	29
3	Betriebliche Faktoren	30
4	Abschreibung und kalkulatorischer Zinsfuß	32
F	Sonstige Investitions- und Betriebsbedingungen	34
1	Vertragswesen	34
2	Eigentumsfragen und rechtliche Kontrolle	35
3	Konkurrierende Wärmeanlagen	35
4	Rentabilität und Gewinnbeteiligung	38
5	Förderungen	39
G	Schluss und Aussicht	42
1	Bewertung Ergebnisse und Forschungsbedarf	42
2	Gesamtpotenzial in Freiburg	43
3	Aussichten und Empfehlung	44

Abbildungsverzeichnis A-I

Anlagen A-II

Literaturverweise A-IV

A EINLEITUNG

Abwasser steckt voll Energie. Das Abwasser aus Haushalten und Gewerbe ist durch die allgegenwärtige Brauchwassertemperatur auch nach Abkühlung im Kanalnetz durchschnittlich um 2 bis 10° C wärmer als das umgebende Erdreich und das Grundwasser. Wenn ausreichend große Abwassermengen zentral zur Verfügung stehen und deren Wärme kostengünstig transferiert wird, kann das höhere Temperaturniveau beim Einsatz von Wärmepumpen mit höherem Wirkungsgrad genutzt werden, als bei den gebräuchlichen Heizungsanlagen zur Nutzung der Erdwärme. Prinzipiell dient das Abwasser im Sommer umgekehrt auch als Wärmesenke, wenn die gleiche Anlage im Betrieb auf Kälteerzeugung umgestellt wird.

Die Idee der Wärmerückgewinnung aus Abwasser ist nicht neu. Die Theorie ist einfach und überzeugend, hat jedoch aufgrund noch zu entwickelnder Technologien für die Wärmeübertragung und -transformation, zum Teil mangelnder Erfahrung und nicht zuletzt wegen der in der Vergangenheit konkurrenzlos niedrigen Gesteungskosten für Warmwasser in der Praxis fast keinen Eingang gefunden.

Die Idee zur systematischen Nutzung von Restwärme aus dem öffentlichen Kanal entstand allem Anschein nach in der Schweiz. Vor allem der Schweizer Ingenieur Urs Studer hat sich um die Entwicklung vollständiger und funktionierender Konzepte verdient gemacht. Er gründete die erste Firma (Rabtherm AG), die sowohl als Planer, als auch als Generalunternehmer und Hersteller von Wärmetauscherelementen agiert. Seit circa einem Jahr gibt es als Folge der vielen Klimakonferenzen wieder verstärkte Bemühungen, um Projekte zur Nutzung der Kanalwärme zu starten. Neben der Rabtherm AG akquiriert jetzt auch Firma Uhrig aus Geisingen auf dem Gebiet der Wärmetauscher. Wie vor ca. 4 Jahren, findet erneut eine Informations- und Werbekampagne statt. Dieses mal mit dem Wärmetauscher-Produkt „Uhrig Therm-Liner“.

Das Thema Kanalwärmenutzung ist mittlerweile in zahlreichen Presseartikeln, Broschüren und auch im Fernsehen als alternative und vorteilhafte Technik zum recyceln von Abwärme publik gemacht worden.

Es gibt ca. ein Duzend in Betrieb befindlicher Anlagen und sehr viel mehr Veröffentlichungen dazu. Mehrere Städte haben ähnlich der hier vorliegende Studie, Karten zur Abschätzung des Energiepotenzials erstellen lassen. Es wird vermutet, dass parallel hierzu vielerorts auch konkrete Untersuchungen über die wirtschaftlichen Realisationsmöglichkeiten angestellt wurden. Es hat sich um das Themenfeld herum ein Insiderkreis von Fachleuten gefunden, die für den Bau von Anlagen eintreten, jedoch in der Regel nicht selbst unternehmerisch tätig werden.

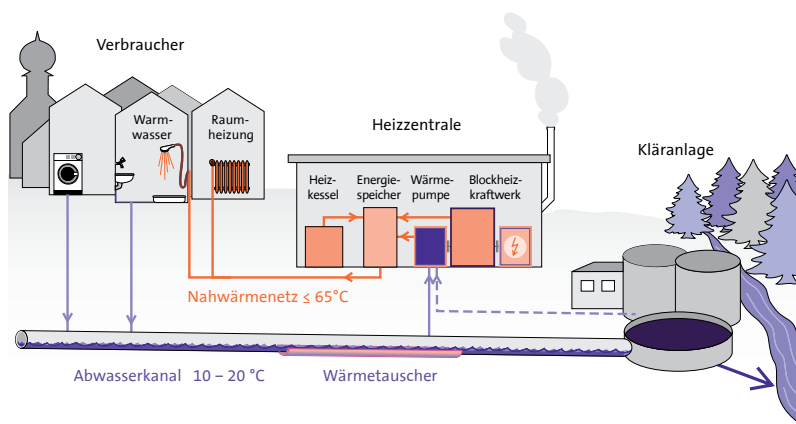


Abb. 1 Prinzip der Rückführung von Wärme aus dem Kanalnetz

Unter günstigen Randbedingungen wird mit der Wärmepumpe aus der Abwasserabwärme effizient und Energie einsparend Heizwärme gewonnen und ein positiver Beitrag zur Schonung der Energiereserven geleistet. Die Technik ist eine Art energetisches Recycling und genießt in dieser Hinsicht im Vergleich zu den meisten anderen Heiztechniken eine besondere Stellung.

In der Schweiz gibt es seitens mehrerer öffentlicher Fachstellen und privater Institutionen wiederholt Initiativen zur Förderung von Projekten zur Kanalwärmenutzung. Neben der Wärmenutzung von Wärme über den zentralen Abwassersammler stehen dabei Projekte zur Nutzung der Abwärme von Abwasserreinigungsprozessen im Blickfeld. In diesem Bereich wird das größte Potenzial für die Reduzierung von Umweltschäden durch Abwärme vermutet. Im hier vorliegenden Bericht wird dieser Bereich nicht näher behandelt, weil es für die besondere örtliche Situation von Freiburg (die Stadt besitzt keine eigene Kläranlage) keine Rolle für die Stadt und für den Energiedienstleister badenova AG & Co. KG spielt.



1 Untersuchungsziel

Grundsätzlich ist die Wärmerückgewinnung aus Abwasser an allen Orten im Kanalnetz sinnvoll möglich, wenn in kleinem, räumlichem Abstand erwärmtes Abwasser aus einem größeren Siedlungsgebiet zur Verfügung steht und gleichzeitig ein Investor und ein geeigneter Abnehmer die rückgeführte Wärme nutzen will.

Zwar gibt es bereits seit 1982 Einzelanlagen in der Schweiz und später auch in Deutschland, die die grundsätzliche Funktionstauglichkeit der Anlage belegen. Eine große Pilotanlage zur Warmwassergewinnung aus Abwasser für ein ganzes Wohngebiet wurde bereits 1999 in Zürich Wibkingen in Betrieb genommen. Im südwestdeutschen Raum wurde die erste Anlage 2005 in Singen gebaut. Erfahrungen im näheren Umkreis und unter den speziellen Bedingungen der Stadt Freiburg gibt es jedoch keine.

Mit den bislang veröffentlichten Berichten über die in Betrieb befindlichen Anlagen konnte die Wirtschaftlichkeit unter den Randbedingungen von Freiburg nicht geklärt werden. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist deshalb die systematische Auswertung der an den bekannten Anlagen gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen und die Überprüfung ihrer Übertragbarkeit auf die Verhältnisse in dieser Stadt.

Die vorliegende Studie ist eine kritische Evaluation der Technik. Durch ein schlüssiges Gesamtnutzungsmodell wird versucht, die Wirtschaftlichkeit der Wärmenutzung unter realistischen Randbedingungen zu überprüfen.

Für Freiburg liegen darüber hinaus noch keine administrativen, logistischen und technischen Erfahrungen zu Bau, Betrieb und Unterhaltung einer Anlage vor. Neben der Entwicklung eines Konzeptes

zur Kanalwärmenutzung sind deshalb auch die bautechnischen, betrieblichen und nicht zuletzt juristischen Fragestellungen zu klären.

Alle bislang vorliegenden Potenzialabschätzungen zur Abwärmebereitstellung und zur Wirtschaftlichkeit der Nutzung zeichnen sich dadurch aus, dass sie die theoretische Gesamtwärmenutzungsmenge beziffern und die technischen und wirtschaftlich sinnvollen Randbedingungen grob beschreiben.

Belastbare und kritische Daten zum tatsächlich realisierbaren Nutzungsspielraum unter dem vorhandenen ökonomischen und baulichen Umfeld sind jedoch nach wie vor rar. Eine Nachberechnung der Wirtschaftlichkeit mit laufenden, an gebauten Heizungsanlagen gewonnenen Daten, die den Wirkungsgrad der Anlage realistisch und präzise beschreiben, wurde bislang noch nicht veröffentlicht.

In diesem Sinne ist eine eigene Abschätzung mit den gegebenen Restriktionen zwar nur eine Ersatzlösung, geht aber bereits über die bekannten Untersuchungen deutlich hinaus.

Vorliegende Studie kann die Entscheidungsfindung unterstützen, ob bzw. bis wann ein Energieversorger wie badenova AG & Co. KG sein Portefeuille mit Formen der Wärmebereitstellung mit Abwärme aus dem Kanalnetz der Stadt erweitern kann und mit welchen Rentabilitätserwartungen er rechnen darf.

2 Ansätze zur Evaluation der Kanalwärmenutzung

Die verfügbaren Daten über die bestehenden Anlagen sind erwartungsgemäß gering. Laufende Betriebszahlen sind entweder nicht systematisch aufgezeichnet oder stehen zumindest nicht frei zur Verfügung. Deshalb wurde der Geschäftsführer der wichtigsten Herstellerfirma für Kanalwärmetauscheranlagen beauftragt, die von ihm erstellten Anlagen detaillierter zu beschreiben und die Daten darüber zur Verfügung zu stellen.

Das für Freiburg und Unterlieger konkrete Potenzial an nutzbarer Abwärme aus dem Kanalnetz ist nach technologischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten noch nicht näher untersucht und quantifiziert.

Um eine möglichst realistische Einschätzung der Nutzungsmöglichkeiten zu erreichen, wurden zunächst die hydraulischen Daten über das Kanalnetz von Freiburg nach den Kriterien des potenziellen Wärmeangebots systematisch ausgewertet und kartiert. Innerhalb von Korridoren im näheren Einzugsbereich der zentralen Hauptabwassersammler von Freiburg wurden im nächsten Schritt Gebäudekomplexe ausgewählt, die nach den bekannten Mindestanforderungen an Größe und Nutzungsform für eine Nutzung von Wärme aus Abwasser prinzipiell geeignet scheinen. Über die bestehenden Heizungsanlagen wurde der tatsächliche Wärmebedarf erkundet und im nächsten Schritt der denkbare Betrieb einer Kanalwärmenutzungsanlage einer Wirtschaftlichkeitsrechnung unterzogen.

Über die Wirtschaftlichkeitsfaktoren wie z.B. Arbeitszahl der Wärmepumpe, mögliche Vorlauftemperaturen und Betriebsart wurden an Einzelobjekten und konkret am Bauprojekt der Sanierung des Marienhauses in der Talstraße mit insgesamt 1.400 MWh Jahreswärmeverbrauch konkrete Überlegungen zu den Möglichkeiten des wirtschaftlichen Betriebes einer Anlage angestellt. Diese Erkenntnisse fließen in die Gesamtübersicht des Nutzungspotenzials der Kanalwärme ein.



Das Potenzial für eine Wärme- und Kälteanlage als zentrale Anlage in einem Neubaugebiet wurde am konkreten Großprojekt ‚Güterbahndareal Nord‘ mit einer, weitgehend als Mischgebiet projektierten Gesamtfläche von 41 Hektar und einer in mehreren Bauabschnitten bereitzustellenden Kapazität für die Jahreswärmeleistung von ca. 23.300 MWh/a mit 11.300 kW Spitzenleistung eingehend studiert.

In die Planung des Baugebietes mit eingeschlossen, ist der Neubau eines zentralen Schmutz- und Mischwassersammlers, der für die Installation der zentralen Wärmeübertragung aus dem Kanal besonders günstige Voraussetzungen bietet.

Es wurden mehrere Heizungsvarianten untersucht und in einem größeren Expertengremium diskutiert. Die Möglichkeiten zur Realisation und die Grenzen der Wirtschaftlichkeit werden im separaten Abschlussbericht dieses Projektes zusammengefasst. (Siehe Anlagen.)

Mit den Ergebnissen dieser Einzelstudien werden im vorliegenden Schlussbericht spezifische Kostenberechnungen zur Abschätzung der Wärmegegostehungskosten erstellt und daran die Anwendbarkeit der Technik unter den Bedingungen des Energieversorgers in Freiburg überprüft und bewertet.

Für die Stadt Freiburg und für das kreuzende Kanalnetz des Abwasserzweckverbandes Breisgauer Bucht wird das Gesamtnutzungspotenzial eingegrenzt und die Bedingungen zur Nutzung der Kanalwärme soweit konkretisiert, dass mithilfe der gefundenen Kriterien und Grenzbedingungen ggf. Anlagenprojekte entwickelt und realisiert werden können, wenn die Voraussetzungen für einen wirtschaftlichen Erfolg gegeben sind.

3 Durchgeführte Untersuchungen

Vorliegende Arbeit wurde unter dem Titel „Konzept zur Nutzung von Wärme aus Abwasserkanälen in Freiburg und Umgebung“ zur Gewährung einer Förderung aus dem Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz der badenova AG & Co. KG, Freiburg mit Antrag vom 15. Oktober 2002 angemeldet und mit Schreiben vom 4. Dezember 2002 durch den Innovationsfond als förderwürdiges Vorhaben mit Projektmitteln ausgestattet.

Im geplanten Projektzeitraum wurden vier Teiluntersuchungen über ein ausführliches Pflichtenheft beauftragt und bis Ende 2003 bzw. Mitte 2004 abgearbeitet:

1. Evaluationsstudie zur Untersuchung realisierter Projekte der Wärmenutzung aus Kanal.
(Auftrag an Studer & Partner AG, Zürich.)
2. Kanalwärmenutzungskonzept Güterbahndareal Nord in Freiburg.
(Untersuchung durch Studer & Partner AG, eingebettet in die Vorstudie von Eproplan GmbH, Stuttgart.)
3. Erstellung eines Informationssystems über Potenziale zur Abwasserwärmenutzung in Freiburg.
(Auftrag an Beller Consult GmbH, Freiburg, in Partnerschaft mit planerwerkstatt A. Berghoff, Vörsstetten.)
4. Projektstudie Wärme aus Abwasser für Marienhaus Freiburg e.V.
(Auftrag an planerwerkstatt A. Berghoff, Vörsstetten.)

Außerhalb des Projektes wurde eine Diplomarbeit begleitet und kontinuierlich weitere Informationen zum Thema gesammelt.

Parallel zur Potenzialstudie Freiburg entstand in Partnerschaft mit Offenburg durch ein weiteres Büro eine Auswertung der Möglichkeiten zur Kanalwärmenutzung über diese Stadt. Die Anwendung wurde am Beispiel eines konkreten Projektes näher untersucht. Diese Studien sind nicht Gegenstand vorliegenden Berichts, wurden jedoch, wie vorgesehen, zum Vergleich der Ergebnisse herangezogen. Die Ergebnisse in Offenburg bestätigen grundsätzlich die vorliegenden Erkenntnisse für Freiburg.

Nachdem die wesentlichen Erkenntnisse zu Möglichkeiten und Grenzen der Wärmenutzung aus dem Kanalnetz als Berichte der genannten Aufträge vorlagen, wurde die Potenzialstudie für Freiburg in einem Abschlussvortrag Anfang 2005 zusammengefasst und die Diskussion mit einer Exkursion zu einer realisierten Anlage am Bodensee vorläufig beendet.

Die Anspannung bei der Energieversorgung und die spürbaren klimatischen Extrementwicklungen der letzten Zeit geben wieder verstärkten Anlass zur Diskussion von Alternativen zur konventionellen Heiztechnik. Die Erkenntnisse aus den Studien über Freiburg werden deshalb im vorliegenden Bericht wieder aufgegriffen und mit Informationen über aktuelle Entwicklungen auf dem Markt ergänzt.

Es werden Vergleiche mit der Stadt Basel (Schweiz) gezogen. Die Erkenntnisse können hierdurch bestätigt und mit Blick auf die Temperaturverhältnisse im Kanal vervollständigt werden.

B FUNKTIONSWEISE UND TECHNIK

Die bislang projektierten Anlagen basieren im Wesentlichen auf konventioneller Technik unter Verwendung von Elektrowärmepumpen, wie sie bei Anlagen zur Nutzung von Erdwärme eingesetzt werden. Erst während der Untersuchung wurde deutlich, dass der alternative Einsatz von gasbetriebenen Anlagen wesentliche Vorzüge aufweist.

Installation und Betrieb von Anlagen zur Nutzung der Wärme aus dem Kanalnetz sind, mit Ausnahme der Wärmetauscher im Kanalrohr, identisch mit denen von Erdwärmeanlagen. Nähere Erläuterungen dazu können deshalb entfallen. Alle speziellen Überlegungen betreffen also die drei Konstruktionselemente Kanalwärmetauscherelement, Zuleitung und Wärmepumpe.

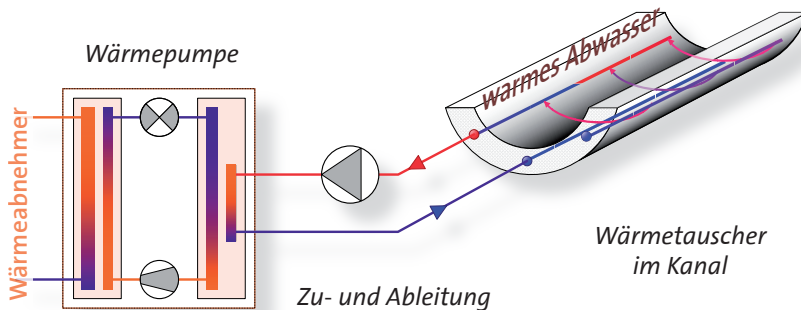


Abb. 2 Prinzip der Wärmeerzeugung aus Abwasser

Sowohl unter ökologischen als auch ökonomischen Gesichtspunkten stehen bei jeder Betrachtung der Wirkungsgrad und die Maximierung des Anteils der Kanalwärmerückgewinnung an der Primärenergiebereitstellung im Zentrum. Daneben stehen Überlegungen zum Betrieb der Anlage und die Kombination der Wärmeanlagenelemente unter Berücksichtigung der Kraft-Wärmekopplung.

1 Wärme und Kälteangebot im Abwasser

Nutzbare Kanalwärmestrecken in Freiburg

Die Potenzialstudie für Freiburg gibt eine Übersicht über die Anzahl und Lage potenzieller Standorte zur Abwasserwärmenutzung im Stadtgebiet. Sie enthält darüber hinaus Information über relevante Randbedingungen an den Einzelstandorten.

Im Kanalnetz von Freiburg stehen folgende Kanalabschnitte theoretisch zur Verfügung:

Trockenwetterabfluss	15 ÷ 60 l/s	33.813 m
(MW-Kanal \geq DN 800)	60 ÷ 100 l/s	16.661 m
	100 ÷ 200 l/s	6.712 m
	200 ÷ 400 l/s	3.087 m
	400 ÷ 600 l/s	4.225 m
Gesamt:		64.498 m

Tabelle 1 Nutzbare Kanalnetzlänge Mischwassernetz Freiburg

Die Randbedingungen wurden zunächst nach den Empfehlungen und Erfahrungswerten der Studer AG gewählt und danach die Kartierung auf Grundlage des Generellen Entwässerungsplanes der Stadt Freiburg aus dem Jahr 2004 erstellt. Die Kriterien für die Auswahl an Kanalabschnitten sind:

1. Vorhandensein eines Mischwasser- oder Schmutzwasserkanals mit Nennweite über DN 800.
2. Mindesttrockenwetterabfluss Q_T über 15 l/s.
3. Entfernung zwischen Kanal und Wärmepumpe i.d.R. unter 200 m.

In den zurückliegenden Jahren wurden in einigen Städten Potenzialkarten für die Bereitstellung von rentablen Kanalwärmenutzungsstellen erstellt. Parallel zur vorliegenden Untersuchung wurde eine Studie für die Stadt Offenburg aufgestellt. Zu einer der ersten Untersuchungen gehört auch die Studie über die Stadt Basel aus dem Jahr 2000 [AUE 2000].

Es gibt Beispiele von Potenzialstudien, die eine noch wesentlich feinere Differenzierung vornehmen. Angesichts der beträchtlichen Fehlerquote bei der Abschätzung des Abwasseranfalls pro Einwohner und der Abschätzung der Einwohnergleichwerte (EGW) pro betrachtetes Einzugsgebiet scheint eine genauere Angabe aber eher unsinnig. Für eine Abschätzung des Leistungsangebotes ist die vorliegende Kartierung von Freiburg vollkommen ausreichend.

Eine genaue Ermittlung auf probabilistischen Annahmen des generellen Entwässerungsplanes der Stadt ist durch Einsichtnahme im Geoinformationssystem jederzeit und haltungsscharf leicht möglich.



Theoretisch nutzbares Gesamt-potenzial Kanalwärme

Bei den Potenzialstudien wird meistens ein theoretisch nutzbares Gesamt-potenzial über den denkbaren Gesamt-wärmeentzug errechnet. Die gesichteten Studien gehen hierbei über z.T. beträchtlich abweichende Rahmenbedingungen aus. Auch die Berechnungsansätze sind nicht einheitlich.

Die Angaben über die Gesamt-potenziale einer Stadt oder einer ganzen Region müssen entsprechend mit größter Zurückhaltung bewertet werden. Für die wirkliche Beurteilung der Frage, wie viel Energie aus dem Kanalnetz zur Verfügung steht, können sie keine Antwort geben.

Im Folgenden eine theoretische Abschätzung für die Stadt Freiburg.

Zur Ermittlung der mittleren Leistung des Wärmetauschers wurden Angaben aus der Studie der EAWAG [O. Wanner 2004] übernommen und in Abhängigkeit von der überströmbaren Wärmetauscherfläche genauere Zahlen für das Netz Freiburg errechnet. Danach ist die Leistung, wie sie von Berghoff nach Angaben von Studer AG für die Potenzialabschätzung für Freiburg verwendet wurde ($W_A = 2,1 \text{ kW/m}$) optimistisch gewählt. Mit Blick auf die weiteren Unzulänglichkeiten der Abschätzung und auf die Vergleiche mit anderen Städten wurde dieser Wert dennoch beibehalten und durch einen vorsichtigen Ansatz der zulässigen Abkühlung kompensiert.

Die Wirtschaftlichkeitskriterien werden an späterer Stelle (siehe 5. Wirtschaftlichkeit) noch ausführlich untersucht. Unter den dort definierten Grenzbedingungen einer durchschnittlichen Jahreswärmegesamtleistung von ca. 780 MWh pro Anlage und Jahr würde das bedeuten, dass in Freiburg theoretisch bis zu 70 Anlagen realisiert werden könnten.

Zulässige Abwasserabkühlung ΔT (12-8°C)	4,00 K
Dichte Abwasser ρ	1,00 kg/l
spez. Wärmekapazität Abwasser c	4,19 kJ/kg·K
Wärmedurchgangswert Wärmetauscher k	860,00 W/(m ² K)
Wärmeentzug Abwasser / Leistung Wärmetauscher	10.467,00 KW
Verluste Verschmutzung (Red.-faktor: 0,60 bis 0,83)	0,61 --
Wärmetauscheroberfläche pro lfm (Durchschnitt) W_A	1,00 m ² /m
Leistung Kanalwärmetauscher (Durchschnitt)	2,10 kW/m
Jahresnutzungsgrad	0,85 --
Durchschnittliche Arbeitszahl der Wärmepumpe	4,20 --
Volllastbetriebszeit Wärmepumpe	4.800 h
Trockenwetterabflussmenge aus Freiburg (in 2001) Q	19.695.682 m ³ /a
Gesamtwärmeleistungspotenzial mit Wärmepumpe	11.678 kW
Nutzbares Gesamtwärmepotenzial mit Wärmepumpe	56.053 MWh/a
Erforderliche Einbaulänge Wärmetauscher	4.988 lfm
Potenziell nutzbare Einbaustrecke ab $Q_t = 60 \text{ l/s}$	30.685 lfm

Tabelle 2 Abschätzung der nutzbaren Kanalwärmekapazität in Freiburg

Für die nach der Wirtschaftlichkeitsberechnung ausgewählten Anlagen werden durchschnittlich 70 lfm Wärmetauscher benötigt. Um das Potenzial auszuschöpfen, sind demnach ca. 4.900 lfm Wärmetauscher notwendig. Diese Zahl wird durch die eben vorgenommene Abschätzung (4.988 lfm) also recht gut bestätigt. Praktisch bedeutet das aber auch, dass sich die Anlagen auf ca. 31 km Kanalnetzlänge konzentrieren müssten. Auf durchschnittlich alle 6.200 m wäre dann ein Abnehmer für die Wärme zu finden. Das scheint zunächst möglich. Unter den gegebenen Bedingungen ist das aber nur sehr, sehr schwer erreichbar, weil sich in Freiburg nur in seltenen Fällen überhaupt die Gelegenheit zu einem Projekt ergibt. Bei den interessanten, größeren Anlagen, bzw. Wärmeverbänden steht die Kanalwärmenutzung im besonders direkten und harten Wettbewerb mit anderen Anlagentypen.

Mindesttrockenwetterschmutzwasserabfluss Q_{TS}

Um ein sinnvolles Verhältnis der Aufwendungen für die Herstellung und den Betrieb von Wärmetauschern zum Mindestwärmemengendargebot einzuhalten, darf eine Mindestabflussmenge nicht unterschritten werden.

$$\Delta T = \frac{W_A}{c \cdot \rho \cdot Q}$$

Die bereitgestellte Wärmeleistung ist abhängig von der Wärmeübertragungsleistung des Wärmetauschers W_A , der zulässigen Temperaturabsenkung des Abwassers ΔT und der Abflussmenge Q . Die Dichte des Abwassers ρ und die spezifische Wärmekapazität des Wassers c gehen als Konstanten ein.



Die Ermittlung der Wärmetauscherleistung ist umfangreich. Zur Ermittlung wird auf die Evaluationsstudie durch Studer AG 2005 und die Ausarbeitungen durch IKT [L. Rometsch 2004] verwiesen. Sie hängt im Wesentlichen vom Durchgangswert und den Verlusten durch die Verschmutzung des Tauschers ab (siehe weiter unten). Als *Mindestabflussmenge* wurde in der Potenzialstudie zunächst der empfohlene Wert von $Q=15\text{ l/s}$ (entspricht mind. 5.000 EGW) verwendet. Wie später noch gezeigt wird, ist ein höherer Wert ab ca. 40 l/s der angemessener. Dadurch schränkt sich allerdings das Angebot an geeigneten Standorten ganz wesentlich ein.

Eine Nachmessung der Abwassermenge an der betrachteten Einzelstelle ist unabdingbar. Bei einer Messung vor Ort sollten neben dem Fremdwasseranteil auch der Verlauf der Abwassermengenschwankung und die Temperaturamplitude über eine längere Periode hinweg aufgezeichnet werden.

Die Überprüfung der GEP-Daten hat bei eigenen Messungen an Einzelstellen im Netz darüber hinaus z.T. beträchtliche Differenzen zwischen Modellrechnung und Wirklichkeit aufgezeigt.

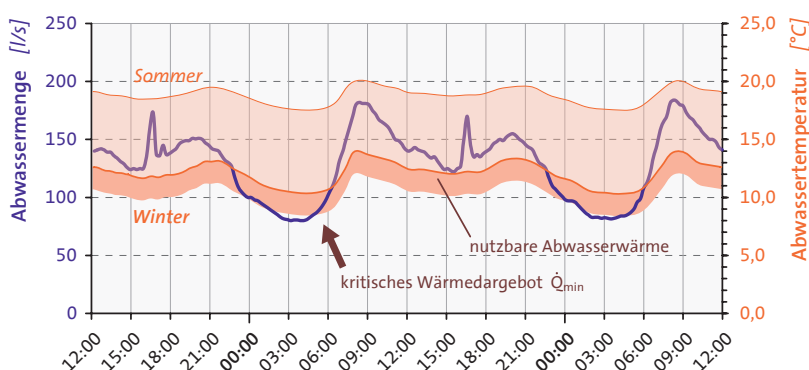


Abb. 3 Beispiel einer Tagesabflussganglinie

Im Tagesverlauf der bereitgestellten Abwassermenge gibt es folgende maßgebliche Einflussfaktoren:

1. Zyklizität Abwasseranfall

Die Abflussmenge hat für jede Stelle und abhängig von der Brauchwassererzeugung einen charakteristischen Tagesverlauf. Er wird mitunter durch besondere, eigenzyklische Ereignisse von Einleitern (z.B. Waschwasserableitung der Brauerei Ganter in Freiburg) überraschend überlagert. Fast immer erreicht er aber in den frühen Morgenstunden sein Minimum.

Das kritische Wärmeangebot fällt leider prozyklisch mit dem Wärmebedarf für die Heizungsanlage zusammen. Wenn die Heizungsanlage im Winter anläuft, ist das Abwasser noch sehr knapp. Der Abfluss erreicht meistens gegen 9:00 Uhr sein Maximum. Dann müssen aber die Gebäude bereits aufgeheizt sein.

2. Fremdwasserabfluss

Der Abfluss tendiert in der Nacht üblicherweise nicht gegen Null, weil Drainagewasser, Quellwassereinleitungen und diffuse sonstige Einträge durch Undichtigkeiten im Kanalnetz für einen kontinuierlichen Mindestabfluss sorgen. Er liegt in Freiburg ähnlich tief wie in Basel bei zeitweise deutlich unter 25 % des Trockenwetterabflusses. Durch die Wärmepufferung im Kanalsystem fällt die Temperatur des Abflusses nicht vollständig auf die Grundwassertemperatur ab. Der Fremdwasserabfluss garantiert die Bereitstellung einer Mindestabflussmenge in den kritischen Nachtstunden und muss deshalb im Gegensatz zu den Wünschen des Kanalnetz- und Kläranlagenbetreibers für die Wärmenutzung eher als Vorteil gesehen werden.

Temperaturen im Abwasserstrom T_Q

Der im Abwasser verfügbare Wärmestrom hängt neben der Wassermenge von der Temperatur T_Q ab. Die Temperaturen im Abwasser werden durch eine ganze Reihe verschiedener Faktoren nachweislich bestimmt:

1. Abkühlung im Kanalnetz

Das Abwasser erreicht seine Durchschnittstemperatur in der Regel bereits im gemeinsamen Straßenabwassersammler. Das aufgeheizte Wasser wird noch innerhalb der Liegenschaft stark abgekühlt

und mit kaltem Wasser vermischt.

Der weitere Wärmeverlust im Kanalnetz ist dagegen, wie durch die EAWAG untersucht, relativ gering. Er bleibt insgesamt bei ca. 1 K.

Eine Wärmerückgewinnung bei Grauwassernutzungsanlagen wird in besonderen Anlagen bereits realisiert. Deren Bedeutung nimmt bei zunehmendem Einsatz von Wärmepumpen insgesamt zu. Mit Blick auf die hohen relativen Investitionskosten für eine Grauwassernutzungsanlage lohnt sich das Recyceln erst ab einer Größenordnung von einigen Kilowatt. Dazu muss ausreichend viel

Abwasser mengenmäßig aufkonzentriert werden.

2. Vermischung mit kaltem Wasser

Fremdwasser im Kanalnetz ist im Jahresverlauf häufig von periodischen Schwankungen des Grundwasserstandes und von privaten



Zuläufen abhängig. Es darf angenommen werden, dass die Jahresschwankungen im Abfluss zu einem bedeutenden Teil hierauf zurückzuführen sind. Zum Nachweis direkter Zusammenhänge reichen die vorliegenden Daten aber nicht aus. Die Auswirkungen des Regen- und Schneeschmelzwassers dämpfen besonders in den Frühjahrsmonaten die anhaltend steigenden Temperaturen im Kanalnetz. Während die mittlere Temperatur im Abwasser durch Niederschläge relativ gering beeinflusst wird, fällt die bereitgestellte Minimaltemperatur dagegen sehr deutlich ab. Leider verhält sich die Wärmemengenbereitstellung diesbezüglich wiederum prozyklisch.

3. Lufttemperatur

Die Wechselwirkungen von Kanalluft und Abwasserabfluss sind vielfältig und bei thermodynamischer Betrachtung mathematisch anspruchsvoll. Die Amplitude der Temperaturschwankungen ist an Wintertagen bedeutend geringer als im Sommer. Hierdurch fallen die Tagestemperaturganglinien ggf. flacher aus als im Sommer.

Das Gesamttemperaturniveau des Abwassers steigt nach einer anhaltenden Trockenwetterperiode mit hohen Lufttemperaturen deutlich an (ca. 4K). Diese Erwärmung erfolgt trotz der gegenläufig wirkenden Grundwassertemperaturen. Demnach ist die Außentemperatur der maßgebliche Faktor für die jahreszeitlichen Schwankungen, nicht der Abwasseranfall.

4. Boden- und Grundwassertemperatur

Das umgebende Erdreich dämpft die Temperaturamplitude des Abwassers. Die Wechselwirkungen wurden noch nicht näher untersucht. Ein Vergleich der beiden Abwassersysteme Freiburg und Basel macht jedoch deutlich, dass mit einer Dämpfung zu rechnen ist. In Freiburg ist die Kläranlage im Gegensatz zu Basel einige Kilometer von der Stadt entfernt. Vorbehaltlich anderer Einflussfaktoren beträgt die Dämpfung der Extrema ca. 1,5 K. Diese Feststellung wird auch durch die theoretischen Untersuchungen der EAWAG 2004 indirekt bestätigt.

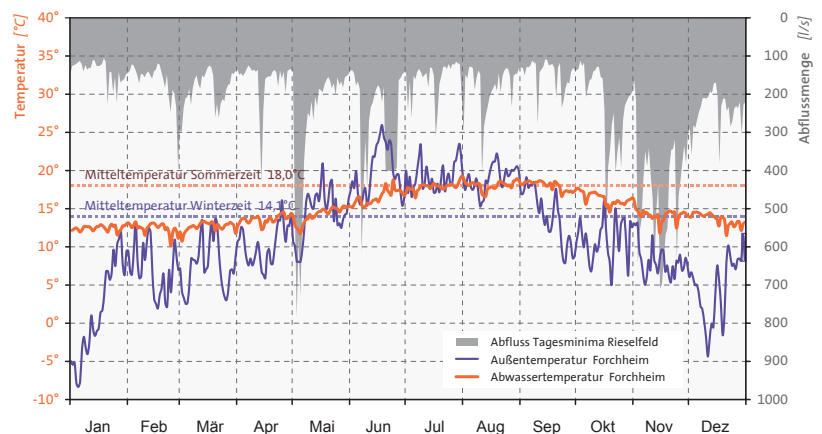


Abb. 4 Jahresentwicklung Abwassertemperaturen in Abhängigkeit von Außentemperaturen und Abflussmenge (Kläranlagen-Zulauf Abwasserzweckverband Breisgauer Bucht 2004)

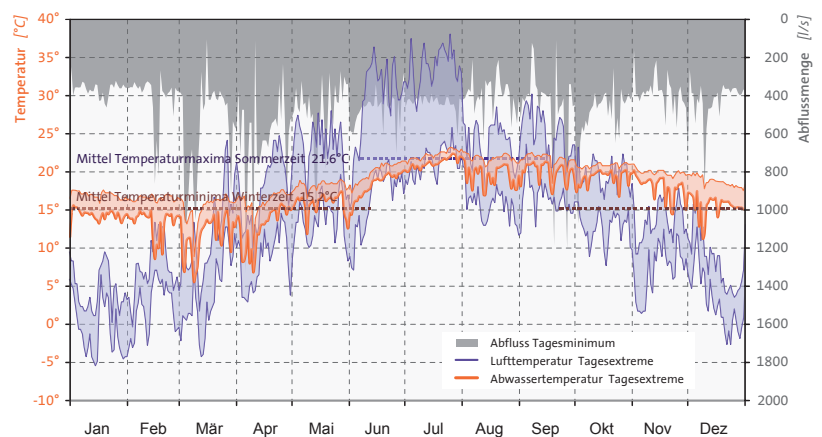


Abb. 5 Periodenentwicklung Abwassertemperaturen in Abhängigkeit von Außentemperaturen und Abflussmenge (ARA-Zulauf ProRheno, Basel 2006)

Interessante Zusammenhänge zwischen den Abwassertemperaturen und dem Grundwasser wurden bei der näheren Betrachtung der Grundwasserdaten in Basel festgestellt.

In dieser Stadt wird seit Jahren eine zunehmende Erwärmung des Grundwassers festgestellt. Mit Blick auf die Gewässerökologie (in den Gewässern wird immer häufiger die kritische Temperatur von 16°C über-



schritten) ist die Entwicklung besorgniserregend. Besonders betroffen sind natürlich die zentralen Stadtgebiete. Hier wurden im Hitzejahr 2003 Spitzenwerte von 16°C mehrfach überschritten. Tendenziell ist aber der gesamte Grundwasserkörper auch außerhalb der Stadt betroffen.

Am folgenden Beispiel ist der Verlauf an einer Messstelle in der Nähe des Stadtkerns von Basel dargestellt. Danach scheint sich die Entwicklung der periodischen Luftmitteltemperatur auch im Grundwasser abzubilden. Vermutlich trägt der gleichfalls gestiegene Grundwasserspiegel dazu bei, dass sich das Wasser in größerer Nähe zur Geländeoberfläche über die Sommermonate stärker aufwärmt.

Analog zum steigenden Grundwasserspiegel in Freiburg werden hier die gleichen steigenden Tendenzen bei den Grundwassertemperaturen vermutet.

Auch in den Außengebieten von Basel werden mittlere Temperaturen von deutlich über 12°C im Jahresdurchschnitt erreicht. Der Temperaturverlauf in den verschiedenen Bodenhorizonten wurde in der vorliegenden Arbeit nicht näher untersucht. Es darf aber unterstellt werden, dass auch in den oberen Bodenschichten hohe Temperaturen erreicht werden, die auch in der Frostperiode unterhalb von ca. 2m im Jahresverlauf nicht wesentlich unterschritten werden.

Der Jahresverlauf der Temperaturamplitude verhält sich mit ca. 7 Monate Verzögerung deutlich antizyklisch zur Lufttemperaturjahresentwicklung. Das heißt, dass in der Frostperiode von Januar bis Februar nach Temperaturniveau ein Maximum an Wärme im Boden zur Verfügung steht.

Die Schwankungen im Grundwasserspiegel sind beim gewählten Beispiel nur sehr gering.

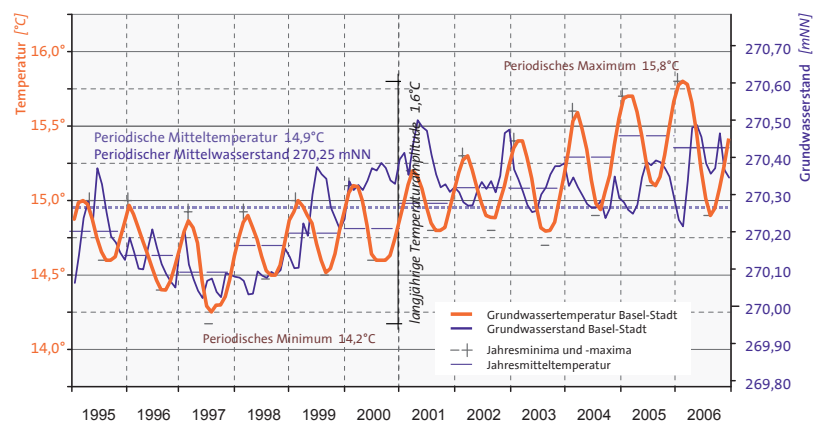


Abb. 6 Periodenentwicklung Grundwassertemperatur Messstelle Thiersteinerschule Basel-Stadt 1995 bis 2006 (OK Terrain = 280,99 mNN)

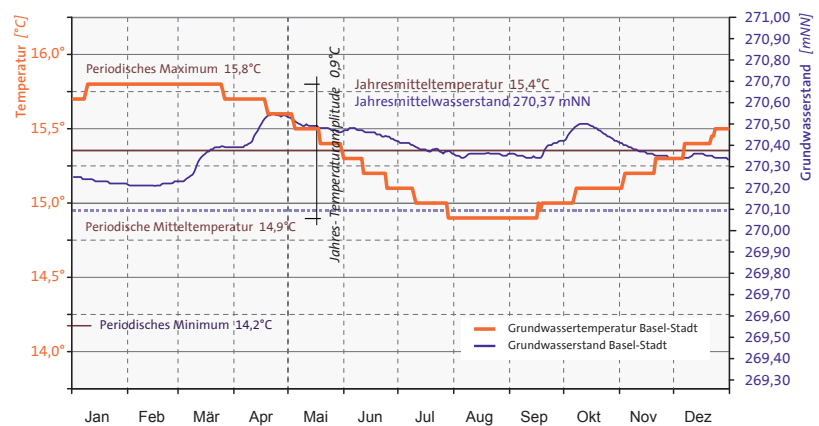


Abb. 7 Jahresentwicklung Grundwassertemperatur Messstelle Thiersteinerschule Basel-Stadt 2006

Es wird vermutet, dass die Situation im Freiburger Westen grundsätzlich vergleichbar ist, weil sich die Bodenverhältnisse ähneln (kf-Wert). Unklar sind die Randeinflüsse der Schwarzwaldvorbergzone, die die zeitlichen Entwicklungsprozesse überlagern.

Selbst bei einer kurzfristigen Wiederabkühlung des Bodenkörpers darf angenommen werden, dass im Boden und ganz besonders im Bereich der oberen Grundwasserzone bzw. im Wechselbereich sehr gute Bedingungen für die Nutzung von Heizwärme gegeben sind:

- Das nutzbare Temperaturniveau ist günstig zu beurteilen.
- Die Wärme ist nahezu unbegrenzt vorhanden.
- Die Wärmequelle ist mit bewährten Verfahren ohne Abhängigkeiten vom Kanalnetzbetreiber erschließbar. Die zu überbrückenden Abstände von Wärmetauscher und Heizungsanlage sind gering.
- Das Wärmeangebot verhält sich prozyklisch zum Wärmebedarf bzw. antizyklisch zum Kältebedarf. Dies verbessert die Jahresarbeitszahlen um fast einen Punkt.
- Die Schwankungen des Grundwasserspiegels sind in aller Regel technisch tolerierbar.

- Es wird bei nicht übertriebener Kältenutzung im Sommer ein Beitrag zum Schutz der Gewässer geleistet.

In der Literatur wird regelmäßig 8° für Heizzwecke und 20°C für Kühlzwecke als die garantierten Temperaturgrenzen für die Wärmenutzung angegeben. Nach vorliegenden Erkenntnissen sind die Werte nicht passend. Zum einen ist der Wirkungsgrad bei diesen Randbedingungen zu niedrig. Zum anderen kann auf längeren Kanalabschnitten ein Wert oberhalb von 10°C auch unter ungünstigen Bedingungen garantiert werden. Der obere Grenzwert von 20°C ist dagegen in kritischen Zeitabschnitten sehr schnell überschritten. Genau in den Momenten, in denen die meiste Kühlleistung abverlangt wird, ist in der Regel auch der geringste Wasserabfluss vorhanden.

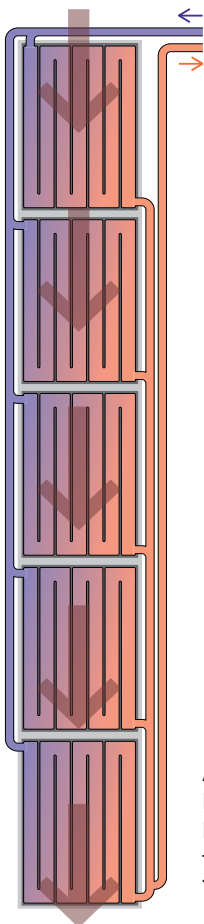


Abb.8 Funktionsprinzip Plattenwärmtauscher nach Tichelmann

2 Kanalwärmetauscher

Die Technik der Wärmetauscher im Kanal ist recht simpel und verhält sich deshalb unter den realen Bedingungen der Herstellung neuer Abwasserkanäle als auch bei der Sanierung von bestehenden Kanalabschnitten relativ gutmütig.

Die bekannten Anlagen arbeiten allesamt nach dem im Heizungsbau üblichen Tichelmannprinzip, bei dem mehrere Wärmetauscherfelder parallel hintereinander geschaltet werden. Eine dritte Leitung besorgt die Zuzufuhr bzw. Ableitung des Wärmetauscherwassers an einer zentralen Stelle im Kanal.

Einbaubedingungen

Die große Trägheit des Systems und die geringe Wärmeübertragungsleistung und -menge erfordern keine sehr spezifischen Anforderungen an die bauliche Gestaltung des Tauschers. Die Temperaturverteilung im Aggregat ist auch ohne komplizierte Konstruktion der Wasserführung unproblematisch. Der niedrige Wärmegradient, die langsame, weitgehend laminare Strömung und die hohe Wärmeleitfähigkeit des Stahls gewährleisten eine sehr gleichmäßige Wärmeverteilung.

Wichtig für die gleichmäßige und vollständige Durchströmung, so die Angabe eines Herstellers, ist die gute Entlüftbarkeit des Systems. Um die Gleichmäßigkeit der Durchströmung aller Aggregate zu gewährleisten, ist ein ausreichend hoher Druckverlust im Wärmetauscher erforderlich. (Ca. 90% des Druckverlustes sollten im Tauscherelement stattfinden.) Gleichzeitig soll der Wärmetauscher möglichst wenig den Querschnitt des Kanalrohres verengen. Hierzu ist der Wärmetauscher möglichst flach auszubilden, was dieser Anforderung entgegenkommt.

Von diesen Faktoren abgesehen, sind es die hydraulischen und baulichen Randbedingungen, die die Form des Wärmetauschers bestimmen:

- Das Abwasser sollte den Wärmetauscher möglichst vollflächig über- oder durchströmen. Dazu ist eine möglichst gute Abstimmung der Gerinnebreite und Tiefe an das Gefälle und die Abflussmenge im Kanal anzupassen.

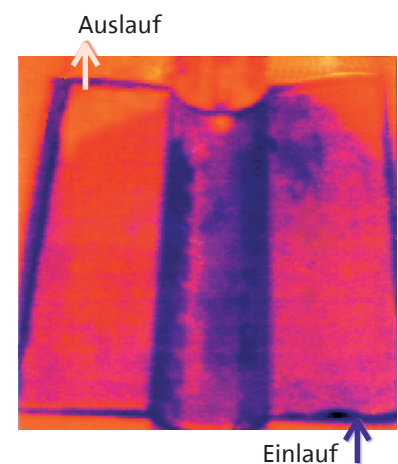


Abb. 9 Temperaturverteilung im Wärmetauscher (Beispiel Firma Uhrig)

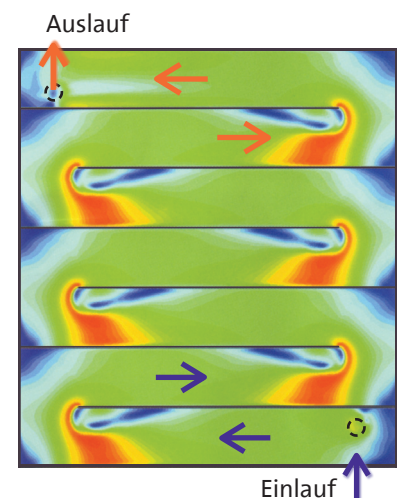


Abb. 10 Strömungsdiagramm eines Wärmetauschers (Beispiel Firma Uhrig)



sen. Die Temperaturverhältnisse im Kanal sind jedoch durch die thermischen Ausgleichsströmungen der Luft verhältnismäßig gleichmäßig, sodass nicht überströmte Anlagenteile von keinem nennenswerten Wärmenachteil sind.

- Die Oberfläche im Gerinne ist möglichst glatt auszubilden, um Ablagerungen und die Geschwindigkeit der Sielhautbildung zu minimieren. Zur Optimierung der Abflusgeschwindigkeit an der Sohle ist eine möglichst exakte Abstimmung von Querschnitt der Niedrigwasserrinne und tatsächlich vorhandener Trockenwetterabflussmenge erforderlich (→ Schleppspannung).
- Zumindest die Bankette des Einbaus sind rutschsicher auszubilden, um den Anforderungen an den Arbeitsschutz bei begehbaren Kanalabschnitten gerecht zu werden (Bankettneigung 1/20). Diese Forderung steht im Widerspruch zu den vorgenannten, hydraulischen Betriebsanforderungen. (Gegenüber den realisierten Anlagen bestehen diesbezüglich Bedenken.)

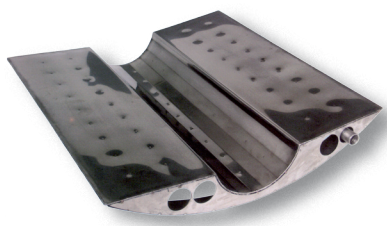


Abb. 11 Beispiel eines größeren Gerinneauftrags bei einem Wärmetauscherelement

- Der Querschnitt des Kanals ist in aller Regel nicht wesentlich einzuschränken. Eine Querschnittsreduzierung von bis über 20% ist aber bei nachträglichem Einbau meist

unvermeidbar und ist auch bei baulicher Optimierung des Systems hydraulisch nicht vollständig zu kompensieren.

- Bei nachträglichen Einbauten ist der Wechsel in der Sohle ein Problem. Nur unter glücklichen Umständen kann der Sohl sprung infolge des Einbaus z.B. im Bereich des vorangehenden Schachtes einigermaßen verträglich ausgeglichen werden. Ganz besonders bei

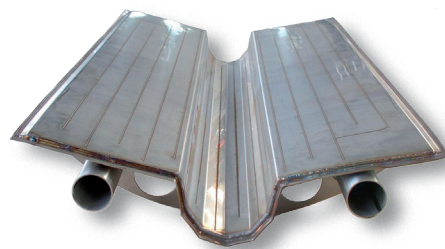


Abb. 12 Ganzflächig durchströmtes Wärmetauscherelement Edelstahl (Beispiel Fa. Uhrig)

den interessanten Fällen größerer Kanalabschnitte ist der nachträgliche Einbau eines Wärmetauschers aus diesem Grund regelmäßig kaum vertretbar, sofern der Kanalbetreiber nicht zu zusätzliche Aufwendungen für die regelmäßige Beseitigung von geruchs bildenden Fäkalablagerungen in Kauf nimmt.

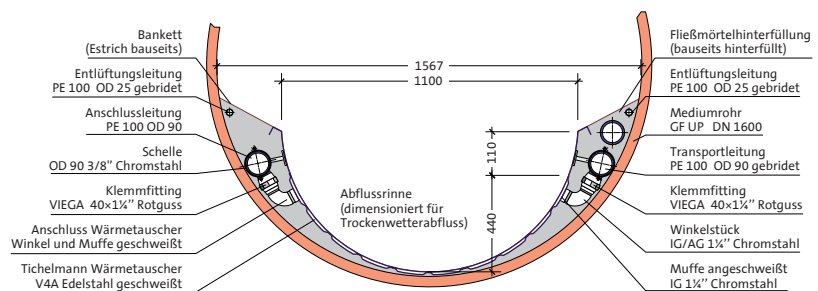


Abb. 13 Gestaltung Wärmetauscherelement (Beispiel Fa. Rabtherm Wien Kanal MA 30)

- Bei seitlich oder oben geführten Zu- und Ableitungen kann der Sohl auftrag sehr gering gehalten werden. Diese Stellen führen aber zu zusätzlichen Verengungen im Abfluss. Unter hydraulischen Gesichtspunkten ist die punktuelle Verdünnung des Rohrs in der Regel unproblematisch. Sie können aber die Gefahr der Ablagerungen, der Verschmutzung im oberen Kanalabschnitt oder sogar der Verlegung im Havariefall deutlich erhöhen. Sie sind außerdem eine lästige Behinderung bei der Reinigung des Kanals.
- Der Übergang zwischen Edelstahlblech und Rohrprofil wird bei einem Betonrohr durch Verpressung der Fugen vollflächig und voraussichtlich langlebig dicht hergestellt. Eine Verklebung mit dem Mediumrohr ist bei Polymerbeton und GFK-Rohren machbar, aber teuer.



Abb. 14 Nachträgliches Einschleiben Wärmetauscherelemente

Bei elastischen und plastischen Rohrmaterialien wie PE oder PVC ist eine dauerelastische Fuge erforderlich, von der auch unter günstigen Umständen bei Weitem nicht die Langlebigkeit unterstellt werden darf wie bei einer monolithischen Bauweise. Die bestehenden Wärmetauschersysteme werden dann eine Haltbar



keit nicht höher als die von Inlinern erzielen.

8. Aufgrund des sehr hohen Edelstahlpreises wird versucht, die Baulänge des Wärmetauschers so kurz wie möglich zu halten. Faktisch wird die Wärmetauscherlänge regelmäßig auf jeweils eine volle Haltungslänge erhöht, um einen guten Übergang zwischen Normal- und Wärmetauscherrinne herzustellen. Auf diese Art und Weise verlängert sich die Strecke regelmäßig um einen Teil der durchschnittlichen Haltungslänge um bis zu 50 m.



Abb. 15 Auf Gleitkufen einführbare Wärmetauscherelemente für Großprofilrohre

Die Wirtschaftlichkeit der Wärmetauscheranlage hängt sehr von der notwendigen Investition hierfür ab. Deshalb wurden die Standortverhältnisse für die Anlagen in Freiburg nochmals nach den Einbaubedingungen differenziert. Für den Einzelfall sollte jeweils noch ein Zuschlag für die Vervollständigung einer Haltungsstrecke kalkuliert werden, was zu zusätzlichen Investitionskosten führt.

Mindestquerschnitt Kanal und Einstieg

Als Mindestquerschnitt für den Einbau eines Wärmetauschers wird in der Literatur eine Nennweite von DN 800 genannt. Das ist die untere Grenze der arbeitsrechtlich zulässigen Begehbarkeit eines Kanals. Ein theoretischer Wert, der in der Praxis als Grenze zumindest

für den nachträglichen Einbau selten Anwendung finden kann. Trotzdem wird er für die Einschätzung des Potenzials als unteres Limit genannt.

Bei einer Sanierung des Kanals in Situ kommt es regelmäßig darauf an, dass der Querschnitt des Kanalrohres nicht verengt wird. Ei-Kanäle erweisen sich beim nachträglichen Einbau von Wärmetauschern diesbezüglich als besonders günstig.

Ein Einbauquerschnitt von mindestens DN 1200 bzw. EI 900/1200 kann nur unter besonderen Voraussetzungen unter realen Verhältnissen unterschritten werden. Praktische Beispiele belegen diese Einschätzung. Zugleich ist der hydraulische Toleranzrahmen bei kleineren Kanälen immer geringer.

In den Fällen des Kanalaustausches ist auch der Einbau in sehr kleine Rohrkaliber möglich.



Abb. 16 Unterseite der für die Einlage in die Rohrschalung vorgesehene Wärmetauscherelemente

Eine solide Konstruktion wird mit einfachen Bauteilen der Wasserversorgungstechnik (Gussrohre mit Muffenverbindungen z.B. Typ TytonSit Dichtungen) aus formschlüssigen, monolithisch hergestellten, außerszentrisch geschaltem Betonrohren realisiert.

Mit Blick auf das unflexible Eingießen der Rohre ist auf eine sehr präzise Fixierung der Muffen bei der Aushärtung des Füllbetons zu achten.

Die Elemente sind je nach Herstellungsart unterschiedlich lang. Bei fabrikseitig hergestellten Fertighohren mit eingebauten Elementen entspricht die Tauscherlänge der Länge des Rohres (in der Regel 2,50 oder 3,00 m). Nachträglich einzubauende Typen müssen ein sinnvolles Kippmass einhalten und erreichen deshalb nur kurze Längen z.B. von 1,20 m.



Abb. 17 Stehend hergestelltes Kanalrohr mit exzentrischer Schalung mit Monolithisch eingegossenem Wärmetauscherelement

In Freiburg weist der Normalschacht eine Nennweite von 1,00 m auf. Selbst wenn der Schachtkonus abgebaut wird, ist unter diesen Bedingungen die Einbringung der Wärmetauscher besonders schwierig. Mit Blick auf die Herstellung der Anschlüsse im Kanal wird in der Praxis diese Einbauweise eher die Ausnahme sein. In den meisten Fällen ist also mindestens an einer Stelle der Abbruch des bestehenden Rohres unumgänglich.

Diese zusätzlichen Kosten ab ca. 10.000 EUR müssen mit berücksichtigt werden.



Abb. 18 Einbringung der Wärmetauscher durch einen bestehenden Schacht

Wärmetauschertypen

Nebenstehende Sammlung an Beispielen realisierter Anlagen macht deutlich, dass im Prinzip nahezu jede Form möglich ist. Es wurden durch den Autor Gespräche mit Anlagenbetreibern geführt. Ernst zu nehmende, technische Probleme bezüglich der Haltbarkeit einer Anlage liegen keine vor.

Der vielfach in Publikationen gezeigte Typ A, wie er in Wibkingen – Zürich verbaut wurde, ist ein Einschleibling, der nachträglich verdämmt wurde. Die Herstellung ist sehr aufwendig. Die Querschnittsverengung des Produktenrohrs ist sehr stark und der Sohlauftrag groß.

Diese Mängel sind beim nächsten Typ B minimiert. Die in regelmäßigen Abständen angeordneten Zuleitungen zu den Wärmetauscherelementen und die offenen Einbauten im Rohr sind dennoch nicht wünschenswert und evtl. betriebsstöranfälliger. Auch dieser Typ ist für den nachträglichen Einbau gedacht.

Die nächste Bauart (Typ C Singen) wird im Werk hergestellt und weist besonders kompakte Formen auf. Die Ausbildung der Sohle ist allerdings genau umgekehrt ausgebildet, wie es hydraulisch

bei wechselnder Wasserableitung wünschenswert ist. Trotz günstig zu bewertender Gesamtreibungsverhältnisse (k-Wert) werden durch die niedrige Schleppspannung an der Sohle unerwünschte Ablagerungen gefördert.

Das klassische Drachenprofil (Typ D Leverkusen) ist für viele Fälle die ideale Form. Um einen nachträglichen Einbau zu ermöglichen, ist allerdings eine seitliche Anordnung der Zu- und Ableitungen notwendig, um den Sohlauftrag zu minimieren (siehe Abb. 13). Außerdem kommt er nicht für größere, seitlich zu begehende Kanäle in Frage.

In dieser Hinsicht ist der Einbau eines Bodenbleches, wie im nächsten Beispiel Typ E (Zwingen) gezeigt, besonders günstig zu beurteilen. Ein solches Rohr kommt aber im normalen Abwasserbetrieb nicht vor. Es ist fabrikationsmäßig und mit Blick auf Statik und Hydraulik nur in sehr besonderen Fällen denkbar.

Auf dem neuesten Stand ist der Kanalwärmetauschertyp, wie er in den jüngsten deutschen Anlagen durch Firma Uhrig als „Therm-Liner“ entwickelt wurde (Typ F Vattenfall Berlin). Die Module sind vollständig aus Edelstahl, sind leicht und kompakt. Sie eignen sich in dieser Hinsicht besonders für den nachträglichen Einbau in bestehende Kanäle.

Die leichte Bauweise minimiert in besonders vorteilhafter Weise die Einbaukosten. Der Rohrauftrag an der Sohle ist so gering wie möglich ausgebildet. In Sanierungsfällen der öffentlichen Kanalisation, bei denen zur Minimierung von Ablagerungen Niedrigwasserrinnen nachträglich eingebaut werden, können diese nicht besser konstruiert werden, als das gezeigte Beispiel der Firma Uhrig.

Ein Sonderfall ist die Ausleitung des Mischwassers aus dem Hauptkanal und die parallel zum Hauptstrang geführte Ableitung des Niedrigwassers (Typ G Wülflingen).

Dieser Typ scheint besonders praxisrelevant. Der sichere Betrieb des Hauptkanals wird nicht wesentlich beeinflusst (Hydraulik und Verengungen). Die Investition ist eindeutig von denen des Kanalnetzbetreibers trennbar.

Gleichzeitig kann der Querschnitt auf den tatsächlich relevanten Niedrigwasserstrom optimiert werden. Die Durchströmung des Wärmetauschers ist ideal.

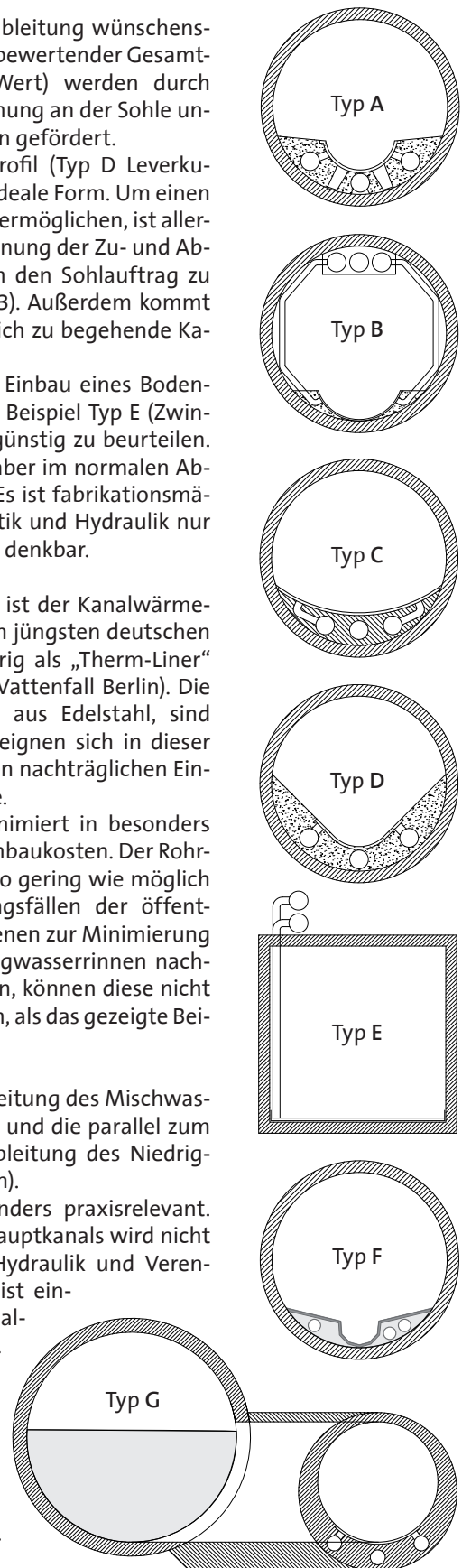


Abb. 19 Beispiele realisierter Rohrbautypen



Der Nachteil liegt natürlich im hohen Preis (Kosten ca. 2/3 höher als bei nachträglichem Einbau im vorhandenen Rohr). Für die Aus- und Einleitung muss der Hauptkanal geöffnet werden. Gleichzeitig ist beim Einlauf zumindest eine Verengung/Schwelle im Hauptkanal erforderlich, um die Umleitung des Schmutzwassers zu gewährleisten. Diese Schwelle erschwert jedoch die Bewirtschaftung des Hauptkanals sehr deutlich.

Beim Wasserstillstand im Hauptrohr werden zudem Ablagerungen gefördert, die sich bevorzugt im unzugänglichen Kanalabschnitt hinter der Schwelle konzentrieren. Im Gesamtergebnis wird festgestellt, dass der Einbau einer schlanken, möglichst wenig aufragenden Rinne wie beim Typ F die universelle und in den allermeisten Fällen praktikabelste Form ist. Bei Kanalsanierungen mit Rohrerneuerung kommen viele Varianten in Betracht. Die Ausbildung mit Drachenprofil (Typ D) ist für den Kanalisationsbetrieb die gebräuchlichste. Sie kommt dem Idealtypus Ei am nächsten.

Gebrauchsmuster, Patente

Firma Rabtherm verfügt über Patente an Kanalwärmetauschern (CH 690 108, D 197 19 311, A 410 111). Die Patentstellung umfasst im Prinzip das gesamte Wärmetauschersystem im Kanal, wie es bei den bekannten Anlagen baulich umgesetzt wurde. Es ist unklar, ob sie als Sperrpatente gedacht sind oder eine Lizenzpflicht zur Refinanzierung der Entwicklungskosten bewirken sollen.

Es konnte nicht eindeutig geklärt werden, welche Auswirkungen diese Rechte tatsächlich auf die Herstellung und den Vertrieb der Anlagen auf Wettbewerber haben. Nach Einschätzung des Autors scheint es kaum denkbar, dass mittelfristig die Durchsetzung eines Monopols wirklich möglich ist. Das angewendete Prinzip von Wärme-

tauschern ist sehr allgemeingebäuchlich. Die Idee für einen Einbau in einen Abwasserkanal wurde nachweislich schon vor vielen Jahren in der Schweiz praktiziert.

Die Aktivitäten der Firma Uhrig können als Indiz gewertet werden, dass sich besondere Ansprüche aus den gewährten Patenten am Markt nicht durchsetzen lassen. Auch ein weiterer Anbieter (TEC Management, Seligenstadt) zeigte sich auf Anfrage ganz ungerührt.

Darüber hinaus bestehen offenbar keine nennenswerten Geschäftsgeheimnisse. (Die vorliegender Studie beigefügten Pläne dürfen gemäß Vertrag mit der Studer AG nicht weitergegeben werden.)

Für ein konkretes Projekt werden in dieser Diskussion keine gravierend nachteiligen Effekte erwartet. Der Preis für ein Wärmetauscherelement bis ca. 2.500 EUR pro Laufmeter scheint unter technologischer und materieller Sicht gerechtfertigt. Der hohe Edelstahlpreis wird durch den Umstieg von EN 1.4401 oder 1.4571 auf EN 1.4521 etwas gemildert.

Durch die engen Grenzen der Wirtschaftlichkeit bleibt darüber hinaus wenig Luft für einmalige Musterentgelte oder Tantieme.

Sehr tief gehende Neuentwicklungen werden auf dem Markt nicht mehr erwartet. Bei der Fortentwicklung geht es vor allem darum, die Einbaufähigkeit bei niedrigem Preis zu flexibilisieren. Dass im Sanierungsfall, wie in Freiburg üblich, der gesamte Kanal durch einen neuen ersetzt wird, ist bundesweit die Ausnahme. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestehender Kanal aus baulichen Gründen zu erneuern ist, beschränkt sich meist auf den Fall der hydraulisch erforderlichen Neudimensionierung.

Demnach ist also der nachträgliche Einbau von Modulen im Kanal der Standardtyp für den Wärmetauscher.

3 Wärmetransportleitungen

Die Leitungskosten für die Verbindung zwischen dem Wärmetauscher im öffentlichen Schmutzwassersammler und der Heizungszentrale sollten erfahrungsgemäß deutlich unter 20 % der Gesamtinvestitionskosten liegen, um eine sinnvolle wirtschaftliche Nutzung zu ermöglichen.

Regelentfernung zwischen Wärmeanlage und Kanal

Eine realistische Einschätzung der aufzubringenden Kosten für die Herstellung ist im Rahmen vorliegender, pauschaler Einschätzung für Freiburg nur bedingt möglich. Die Chance für ein Projekt hängt in vielen Fällen davon ab, ob nicht bereits aus anderem Anlass ein geeigneter Graben hergestellt werden muss. In einem solchen Fall sind auch wesentlich längere Distanzen zwischen Wärmetauscher und Heizzentrale kostengünstig realisierbar.

Neben der Kostenfrage sind auch eigentumsrechtliche Fragen zu klären bzw. zu umgehen. Für zu bestellende Grunddienstbarkeiten gelten die gleichen Bedingungen wie bei anderen Leitungen zur Versorgung.

Nach Überprüfung der thermodynamischen Randbedingungen darf festgestellt werden, dass die Wärmeverluste durch längere Leitungen weitgehend vernachlässigbar sind. Die Temperaturniveaudifferenz zum umgebenden Erdreich ist, wenn überhaupt, bei den üblichen PE-Leitungen unmaßgeblich.

Dagegen spielt der Querschnitt eine maßgebliche Rolle für die Strömungsgeschwindigkeit und die daraus resultierenden Verluste. Der Pum-



penbetrieb wird mit zunehmender Länge teurer. Umgekehrt wachsen die Kosten für einen höheren Leitungsquerschnitt. Letzterer bedarf einer genaueren Berechnung, um deutlich über den geforderten, inneren Reibungsverlusten der Wärmetauscher zu bleiben.

Verlegung und Technik

In der Regel werden heute zwischen dem Wärmetauscher im Kanal und der Heizzentrale PE-Leitungen mit spiegelgeschweißter Verbindung und/oder mit Elektrofittingen ausgestatteten Formstücken verlegt. Die Technik entspricht in allen Details denen der Wasserversorgungsleitungen. Eine besondere Wärmedämmung ist aufgrund der niedrigen Wärmeübergänge nicht erforderlich.

Zur Vermeidung von hohen Förderleistungen der Pumpen liegt die Dimensionierung bei ab OD 65 (80).



Abb. 20 Beispiel offen geführte Ein- und Ausleitung der Zubringerleitungen

Einen Fachmann im Bereich des Kanalbetriebes wissen die offenen Einbauten und die Befestigungen der Leitungen im Kanal wohl in den seltensten Fällen zu überzeugen. Während man sich sonst Gedanken um die Minimierung des kb-Wertes und die Vermeidung je-

der störenden Gerätschaft im Kanal macht, müssen bei einem nachträglichen Einbau diesbezüglich große Kompromisse geschlossen werden.

Die Lösung liegt sicherlich darin, dass an der Stelle der Einleitung in und Ausleitung aus dem Kanal nicht durch das Rohr bzw. einem Schacht erfolgen, sondern von außen direkt in der Höhe der Kanalsole.

Für den Fall, dass der Kanal nicht zu tief liegt, wird dem Kanalnetzbetreiber empfohlen, diesbezüglich klare bauliche Auflagen für die Projektierung der Anlage zu machen.

Im Gegensatz zu Ausführungen in der Literatur ist es nach Erfahrungen an Anlagen in der Schweiz wenig empfehlenswert, den Primärkreislauf mit Additiven wie Glykol auszurüsten. Zum einen wird die Wärmekapazität des Wassers reduziert (Wirkungsgrad), zum anderen werden durch den Verzicht Umweltgefährdungen grundsätzlich ausgeschlossen und Kosten minimiert.

Die Anlage ist aber sorgfältig zu entlüften und die Rohrleitungen großzügig zu dimensionieren, um eine gleichmäßige Durchströmung und lokale Vereisungen durch Unterkühlungen zu verhindern.

4 Wärmepumpe

Bei den vorliegenden Untersuchungen und Berechnungen wurde regelmäßig mit den Betriebs- und Kostenpunkten einer Elektro-Kompressionswärmepumpe gerechnet. Erst im Verlaufe der Diskussion mit den zur Untersuchung beauftragten Ingenieurbüros wurden die Vorteile einer gasbetriebenen Anlage deutlich: Die Ökobilanz ist besonders unter den deutschen Herstellungsbedingungen von Strom für Gasmaschinen deutlich günstiger und die laufenden Energiekosten machen Gasanlagen offensichtlich langfristig wirtschaftlicher. Der Nachteil höherer Anschaffungskosten ist im Vergleich zu den betrieblichen und energetischen Randbedingungen langfristig nachrangig. In sehr vielen Fällen ist der Gasanschluss für die Brauchwassererhitzung oder den Spitzenlastkessel bereits vorhanden.

Der Markt an gasbetriebenen Anlagen ist nach Auskunft der Ingenieure jedoch noch deutlich eingeschränkter als bei strombetriebenen Anlagen. Es wurden nur zwei Lieferanten für Anlagen über 60kW Nennleistung genannt. Neue Produkte sind vor allem aus Fernost zu erwarten, wo vor allem der Aspekt der Gebäudekühlung im Vordergrund steht.

Die niedrigen Auslegungstemperaturen moderner Gebäudetemperiersysteme und die relativ konstanten Wärmequellentemperaturen erd- oder abwassergekoppelter Systeme bieten gute thermodynamische Voraussetzungen für den Einsatz von Gaswärmepumpen: Geringer Temperaturhub sowie relativ stabile Temperaturverhältnisse sowohl auf der Verdampfer- als auch auf der Verflüssigerseite.

Eine eingehendere Untersuchung der unterschiedlichen Investitions-, Betriebs- und Unterhaltsbedingungen hat im Zusammenhang mit Kanalwärmenutzung offenbar bislang noch nicht stattgefunden.

Wärme aus Abwasser

Technik und Potenzial in Freiburg i.Br.

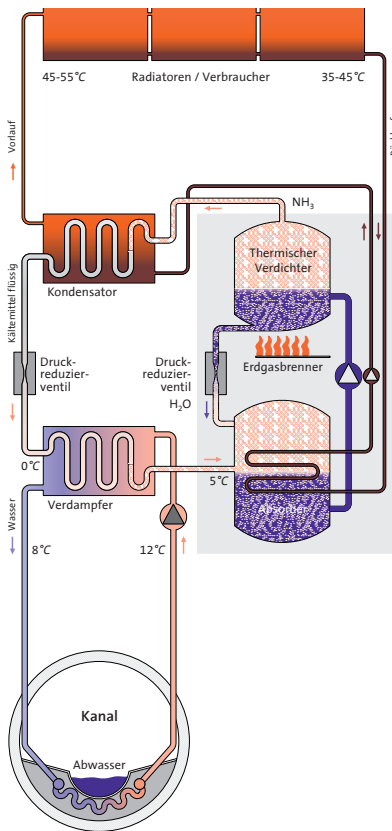


Abb. 21 Schema gasbetriebene Absorptionswärmepumpe

Während die Technik für gasbetriebene Absorptionswärmepumpen keine besonders innovativen Punkte aufweist, sind bei Adsorptionspumpen mit alternativen Zwischenmedien und hohem Unterdruck sowie bei Kompressionswärmepumpen in Verbindung mit Wärme-Kraft-Kopplung einige Entwicklungen absehbar. Der Auslastungsgrad könnte durch lastabhängige, alternative Herstellung von Wärme/Kälte und Strom optimiert werden.



Abb. 22 Beispiel gasbetriebenen Kompressionswärmepumpe

Bei der Wärmepumpentechnik kann beim Antrieb vermehrt auf in der Fahrzeugtechnik übliche und bewährte Gasmotoren gesetzt werden.

Interessant scheint die Kombination von Blockheizkraftwerktechnik, bei der alternativ entweder Strom induziert oder durch Kompression Kältemittel verdampft und Wärme erzeugt wird.

Im Gegensatz hierzu ist der wiederholt anzutreffende Ansatz, bei dem durch ein BHKW Strom und dann Kompressionswärmepumpen elektrisch betrieben werden nicht besonders effizient.

Die Kreislaufprozesse bei Wärmepumpen und Kältemaschinen sind thermodynamisch die gleichen. Bei der Wärmepumpe wird die warme Seite (Verflüssiger) und bei der Kältemaschine die kalte Seite (Verdampfer) genutzt. Aus diesem Grund ist die Beheizung als auch Kühlung von Gebäuden nutzbar. Es gibt aber nur ein entweder oder.

Die Arbeitszahl bei der Kühlung ist geringer: Die Leistung der Maschine ist bei Kühlbetrieb bei gleicher Leistungsaufnahme deutlich kleiner. Außerdem liegen die Temperaturen des gleichen Abwassers im Kanal im Sommerbetrieb mit bis über 10K deutlich höher als im Winter. Berücksichtigt man fernerhin, dass gerade an den wärmeintensivsten Tagen im Jahr gleichzeitig auch das Wasserdargebot im Kanal regelmäßig am geringsten ist, dann muss mit einer Arbeitszahl (COP) bei einer Kompressionswärmepumpe von deutlich unter 4 gerechnet werden.

Vergleicht man hingegen diese Art der Kältegewinnung mit den heute weltweit vorherrschenden Maschinen, bei denen mit elektrischem Strom bei höchsten Lufttemperaturen Kleinanlagen auf Dächern und in Vorgärten betrieben werden, dann ist der Wirkungsgrad geradezu sensationell günstig.

Die Dimensionierung der Anlage entspricht der vergleichbarer konventioneller Technik von Blockheizkraftwerken und bedarf deshalb hier keiner besonderen Erläuterung.

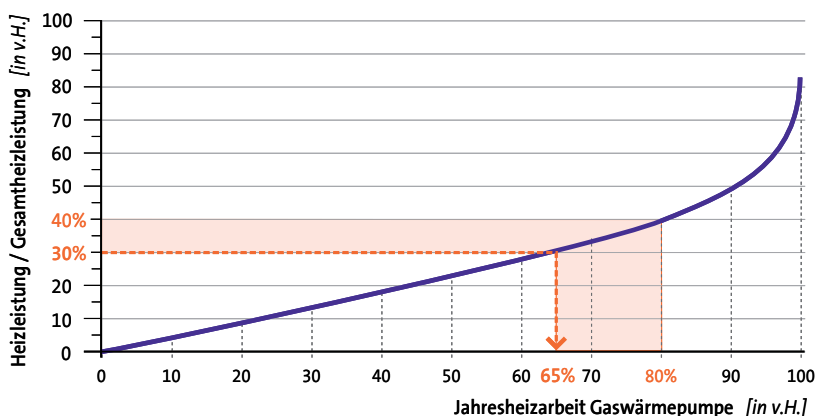


Abb. 23 Empfohlene Heizleistung und Jahresheizarbeit Gaswärmepumpe

In fernöstlichen Industrieländern hat man den steigenden Bedarf für Gaswärmepumpen erkannt und entwickelt deshalb mit Nachdruck moderne Kälteanlagen im bivalenten Betrieb.

Die gleiche Technik kann doppelt genutzt werden kann. Damit ist sie der konventionellen, geteilten Heizungs- und Kühltechnik überlegen.



Es ist wichtig, dass der Primärkreislauf sorgfältig überwacht wird, damit es nicht zu lokalen Unterkühlungen in den Wärmetauschern und den Zuleitungen kommt. Eine Unterschreitung der Vorlauftemperatur sollte nicht unter 5°C abfallen, um Vereisungen zu verhindern und den Wirkungsgrad nicht abfallen zu lassen. Eine Vereisung ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass die Dimensionierung nicht stimmt.

5 Gebäudeheizungstechnik und Brauchwassererzeugung

Bei dem der vorliegender Untersuchung zur Wirtschaftlichkeit hinterlegten Berechnungsmodell (siehe Anlage) kann bei den ausgewählten Einzelobjekten in Freiburg mit dem Ziel einer möglichst gleichmäßigen und hohen Auslastung der Wärmepumpe bei gegebenem Gesamtjahresnutzungsgrad eine individuelle Festlegung des Anteils der Jahresheizarbeit vorgegeben werden. Bei den hier angestellten Wirtschaftlichkeitsberechnungen für den Heizbetrieb wird von einem Jahresnutzungsgrad von bis zu 85% ausgegangen.

Durch die Nutzung als Kältemaschine ist die Anlage noch besser auszulasten, sodass sich eine geringfügige Verbesserung der Nettogestehungskosten erzielen lässt.

Die Umstellung des gesamten Betriebs auf Kälteerzeugung schränkt das Angebot an Kälte leider grundsätzlich auf das Sommerhalbjahr ein: Die Anlage kann keine Prozesskälte z.B. für Labors und andere gewerbliche Einrichtungen ganzjährig bereitstellen.

Die Temperaturobergrenze für den Wärmepumpenkreislauf liegt bei handelsüblich eingesetzten Kältemitteln bei maximal 70°C. Bei solchen Hochtemperaturen fällt die Arbeitszahl der Anlage stark ab. Entgegen den Vorschlägen des mit der Evaluation beauftragten Ingenieurbüros gehen die Autoren zum Thema Wärmepumpe regelmäßig davon aus, dass die Warmwasseraufbereitung grundsätzlich getrennt erfolgt, um den Wirkungsgrad der Hauptanlage zu verbessern.

Bei den Wirtschaftlichkeitsberechnungen wird die Brauchwasserbereitung nicht mit kalkuliert.

Die Temperaturspreizung des Wärmeversorgungsnetzes ist so auszulegen, dass auch bei höchster Vorlauftemperatur und/oder höchstem Wärmebedarf (z.B. bei der Raumheizung im Winter) die Rücklauftemperatur so niedrig anliegt, dass die gesamte anfallende Kondensationswärme abgeführt werden kann.

Bei der Projektierung von Sanierungsobjekten, bei denen an der bestehenden Heiztechnik wenig umgebaut werden soll, kann die notwendige Temperaturspreizung z.T. durch Austausch der Temperaturregler an den Radiatoren nennenswert verbessert werden.

Bei Neubauten sollte das Heizniveau generell möglichst unter 50°C Vorlauftemperatur ausgelegt werden. Gebäude mit Bodenheizung sowie Schwimmbäder, die einen hohen niedertemperierten Wärmebedarf aufweisen, erfüllen deshalb am ehesten die Wirtschaftlichkeitskriterien. Einer der dienstältesten Anlagen in der Schweiz läuft genau aus diesem Grund preisgünstig.

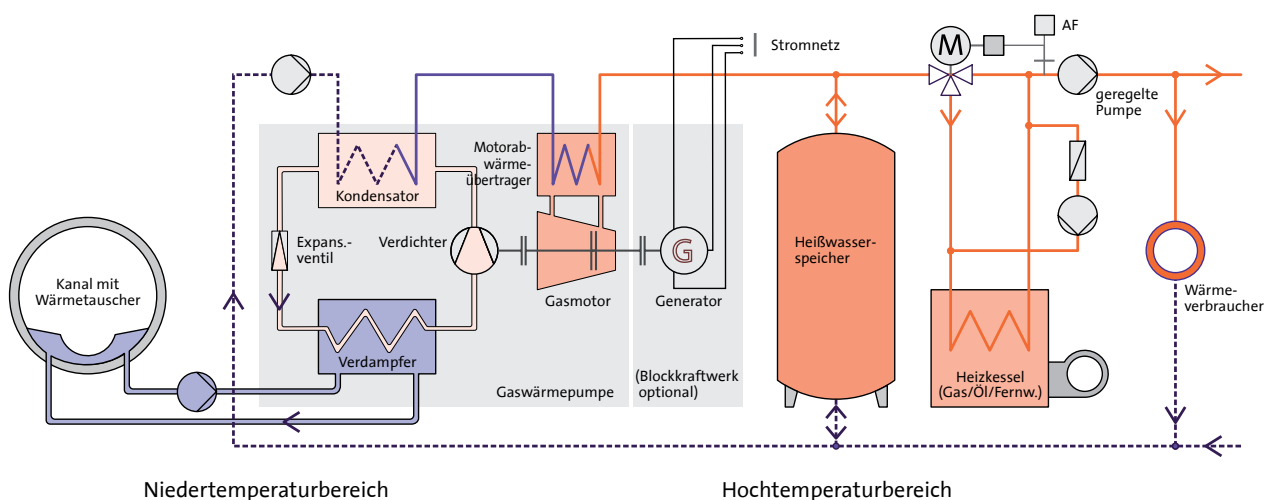


Abb. 24 Einbindung von Kanalwärmetauscher, Gaswärmepumpe, Pufferkessel und Heizkessel

Wärme aus Abwasser

Technik und Potenzial in Freiburg i.Br.



Im Kondensator wird der Rücklauf des Heizwassers aufgewärmt und dann nacheinander durch den Motorkühlwasser- und Abgaswärmeübertrager der Gaswärmepumpe geführt. Durch diese Serienschaltung lässt sich eine höchstmögliche Vorlauftemperatur erreichen. Ein zur Gaswärmepumpe parallel geschalteter Heizwasserspeicher im Heizkreislauf ermöglicht eine energetische und betriebliche Optimierung der Gasmotorwärmepumpe in Zeiten mit geringer Wärmeabnahme durch die Verbraucher.

Zur Vermeidung eines unwirtschaftlichen Taktbetriebes (kurzes Ein- und Ausschalten) ist der Heizwasserspeicher so zu dimensionieren, dass die Gaswärmepumpe eine Laufzeit von jeweils mindestens einer Stunde erreicht. Im umgekehrten Fall, also bei hoher Wärmeab-

nahme, sollte der Spitzenlastkessel erst dann in Betrieb gehen, wenn das Wärmeangebot der Gaswärmepumpe und des Heizwasserspeichers über einen definierten Zeitraum nicht mehr ausreicht.

Zur Sicherung der Wärmebereitstellung besonders in den frühen Morgenstunden wäre ein Latentwärmepuffer für rund 8 Stunden zweckmäßig. Damit wird dem prozyklischen Tagesverlauf beim Kanalwärmeangebot gegengesteuert. (Zum Wärmeangebot siehe weiter oben.) Die Investition dafür ist relativ hoch.

Zusätzlich kann der Auslastungsgrad der Anlage durch die bedarfsweise Ankopplung eines Stromgenerators zur Netzeinspeisung noch weiter verbessert werden.

Entscheidend für eine hohe Wirtschaftlichkeit der Gaswärmepumpe ist sowohl das Temperaturniveau der Wärmequelle als auch die Systemtemperatur der Heizungsanlage. Je geringer der Temperaturhub zwischen Wärmequelle und Heizsystem, umso wirtschaftlicher arbeitet die Gaswärmepumpe.

Ideal ist die Kombination aus Kanalwärmekollektoren mit Fußbodenheizungen. Soll mit der Wärmepumpe auch gekühlt werden, so bieten sich für gewerbliche Gebäude Heiz-/Kühldecken bzw. die Betonkerntemperierung an. Der Mehraufwand für die Ankopplung eines weiteren Wärmetauscherelementes für den Kühlkreislauf ist gering.

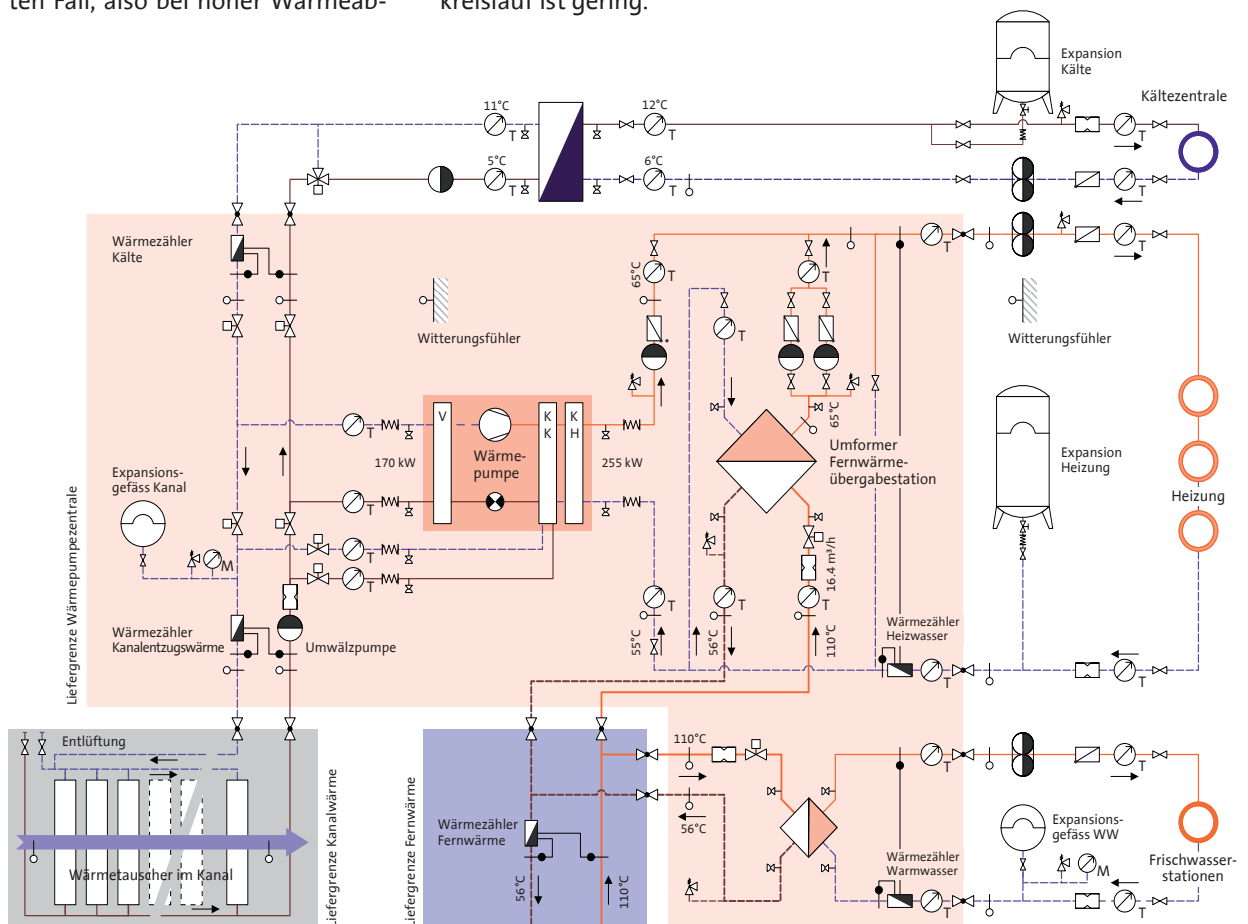


Abb. 25 Vollständige Anlagenzusammenstellung mit Kälte- und Wärmeproduktion und mit Anbindung an Fernwärmenetz (Schema in Anlehnung an 240kW-Anlage Leverkusen)



Alternativ zum mit öl- oder gasbetriebenen Heizkessel ist die Anbindung an das Fernwärmenetz möglich. Wenn diese Energie zur Verfügung steht, kann mitunter die Kapitalbindung für die Kesselanlage beträchtlich reduziert werden. Im Sommerbetrieb lässt sich der Fernwärmeanschluss ggf. auf die Brauchwassererwärmung reduzieren.

Gasbetriebene Wärmepumpen sind im Anwendungsbereich ähnlich denen von Blockheizkraftwerken. Anders als bei Elektrowärmepumpen decken sie einen größeren Bereich ab. Die redundante Installation einer konventionellen Heizkesselanlage, die nicht nur den Spitzenbedarf, sondern regelmäßig auch den gesamten Grundlastbedarf bedient, kann unter Umständen entfallen. Die Investitionskosten für den Heizkessel reduzieren sich ggf. auf die Vorhaltung des Spitzenbedarfs wie beim Blockheizkraftwerk.

Anders als beim Betrieb der Wärmepumpe und bei den angeschlossenen Wärmetauschern im Kanal ist die Anlage im Gebäude aber wegen grundsätzlich unterschiedlicher Anordnung und wegen der meist unterschiedlichen Konstruktion der Heiz- bzw. Kühlelemente jeweils nur zu einem Zweck nutzbar.

C RAHMENBEDINGUNGEN

Es darf angenommen werden, dass die bislang realisierten Projekte nicht unter vollkommen optimalen Bedingungen installiert wurden. Vielmehr stellen sie einen möglichen Kompromiss unter den gegebenen Faktoren aus Kanalwärmeangebot, Wärmeabnahme und Anlagenbetreiber dar und sind sicherlich auch Ausdruck strategisch politischer Überlegungen. Die abgeschätzten Jahresarbeitszahlen sind mit Blick auf die Rentabilität der jeweiligen Anlage, verhältnismäßig klein.

Dennoch gibt es diesbezüglich bei den Betreibern keine offensichtlichen Klagen. Bei allen angefragten Betreibern wurden keine Besonderheiten außerhalb des üblichen Rahmens von konventionellen Heizungsanlagen genannt.

	Leverkusen	Singen	Wipkingen	Zwingen	Binningen	Wülflingen	
Länge WT Kanal [m]	120	30	200	10	141	78	
Leistung WT Kanal [kW]	170	172	847	52	230	605	
Energiebedarf [MWh/a]	Wärme	1200	1620	8600	330		2850
	Kälte	545	140				
Energie aus Abwasser [MWh/a]	Wärme	840	980	3100	184	1800	2700
	Kälte	245	140				
Jahresarbeitszahl [-]	3,0	3,9	3,0	5,0	3,5	3,8	

Tabelle 3 Vergleichstabelle realisierter Anlagen (Beispiele)
[Angaben nach Evaluationsstudie von Studer AG 2003, ergänzt]

1 Abwasseranlagenbetrieb

In der Literatur zum Thema wird wiederholt sehr ausführlich auf die Auswirkungen der Kanalwärmenutzung auf die Reinigung des Abwassers in der Kläranlage eingegangen. Insbesondere die denkbaren Nachteile für die biologische Stufe der Kläranlage werden näher analysiert. Daraus werden Grenzwerte für die Kanalwärmenutzung abgeleitet.

An dieser Stelle kann auf diese Betrachtungen verzichtet werden. Zum einen sind die Erkenntnisse verfahrenstechnisch nicht neu. Zum anderen ist das Kanalwärmeangebot in einer Stadt wie Freiburg im Vergleich zu den notwendigen Bedingungen für die Installation einer Anlage dermaßen groß, dass auch mit Blick in die Zukunft nicht an die Endlichkeit des Wärmeangebotes gedacht zu werden braucht.

Es wird vermutet, dass selbst bei einer vollausgebauten Nennleistung von potenziell 11,7 TW wenig merkbare Temperaturverluste an der Kläranlage messbar sind. Auf dem kilometerlangen Weg des Abwassers durch die Breisgauer Bucht von Freiburg bis Forchheim wird das Temperaturminimum durch die Grundwassertemperatur nach unten hin limitiert.

Ein überaus wichtiges Thema ist dagegen der Wirkungsgrad der Wärmetauscher im Kanal. Der Wärmeübergang am Kollektor wird bereits durch den geringsten Biofilm drastisch eingeschränkt. Hierzu wurde durch die Eidgen. Anstalt für Wasserversorgung und Abwasserreinigung und Gewässerschutz [EAWAG 2004] eine eingehende Studie zur Entwicklung und möglichen Beseitigung der Sialhaut erstellt.

Im Ergebnis darf festgehalten werden, dass selbst bei sehr geringen Reinigungsintervallen des Wärmetauschers die Nachteile der Bildung des Biofilms nicht effektiv verhindert werden können. Wie noch später nachgewiesen wird, ist der Gewinn an Wirkungsgrad im Vergleich zum Aufwand für eine laufende Reinigung des Wärmetauschers im Vergleich zu den erhöhten Aufwendungen für eine größere Wärmetauscherfläche verhältnismäßig gering.



Abb. 26 Biofilmbildung nach Ablauf von 16 Tagen mit ca. 1÷2 mm Auftragsstärke

Nach eigener Berechnung scheint es sinnvoll, die turnusmäßigen Reinigungen des Kanals (in Freiburg bislang jährlich) wie üblich durchzuführen. Dadurch werden dauerhafte Verkrustungen und Sedimentationen langfristig verhindert. Bei ausreichender Strömung (-> Gefälle, Rohrdurchmesser) hält sich der laufende Abtrag des Biofilms mit der Neubildung die Waage.

Die in der Literatur genannten Beispiele für Spüleinrichtungen und

Schikanen zur Erhöhung des Abstroms im Biofilm sind nach eigener Betriebserfahrung wenig tauglich. Besonders unnützlich erscheinen die empfohlenen kleinen, automatischen Spüleinrichtungen. Es lässt sich schnell nachweisen, dass die Reinigungsleistung selbst größerer Anlagen auf einen örtlich sehr begrenzten Raum und vor allem auf die Verhinderung der Sedimentation beschränkt. Da Wärmetauscher erst ab Abflussgrößen von ca. $Q_s = 20\div 40 \text{ l/s}$ überhaupt lohnen, müssten zudem Spüleinrichtungen solch großen Ausmaßes realisiert werden, dass die Investition nicht mehr im Verhältnis zum erwarteten Effekt steht.

In Spezialfällen können eventuell mechanische Räumanlagen oder installierte Hochdruckreiniger weiterhelfen. Nach überschlägiger Schätzung der Investitions- und Betriebskosten dafür und auch mit Blick auf die nachteilige Beeinflussung des laufenden Kanalbetriebs, sollte auf solche Anlagen aber im Regelfall verzichtet werden.

Die erwarteten hydraulischen und betrieblichen Behinderungen an der lokalen Einbaustelle wurden weiter oben bereits mit ihren Auswirkungen auf den Netzbetrieb eingeschätzt. Natürlich ist jeder Einbau von Geräten und Leitungen nachteilig. Er ist jedoch nicht größer als z.B. beim Einbau von Elektrokabeln im Kanal.

Der zusätzliche Aufwand für Inspektion und Reinigung der Wärmetauscher wird bei den Wirtschaftlichkeitsberechnungen mit einem kleinen Jahresbetrag berücksichtigt.

Es wird davon ausgegangen, dass die örtlichen, hydraulischen Anforderungen an das Kanalrohr grundsätzlich vorab geklärt sind. Die regelmäßige Einschränkung des Querschnittes von bis über 20% darf bei vollständig integrierten Wärmetauschern ähnlich wie bei Inlinern mit einer Ermäßigung des Gesamtreibungsfaktors abgemindert werden weil die Oberfläche des Edelstahls optimale Reibungsverhältnisse aufweist.

Die Begehung größerer Kanäle kann durch den Biofilm auf sehr glatter Stahloberfläche gefährlich werden. Bei einem monolithisch hergestellten Wärmetauscherelement mit sinnvoll ausgebildeter, glatter Rinne werden aber keine wirklichen Nachteile für den Kanalbetrieb erwartet. Die neuerdings hergestellten Elemente eignen sich sogar hervorragend zur Verbesserung der Schleppkraft bei Trockenwetterabfluss. Sofern keine Standardbauelemente wie Keroliner in Frage kommen, wird diesen Bauelementen beste Eignung für die Sanierung bescheinigt.



Abb. 27 Beispiel für ungünstige Gestaltung der Anlage aus kanalbetrieblicher Sicht

Es wurden bislang offenbar keine Fälle von Schäden durch Alterungsprozesse bekannt. Bei einem einwandfrei hergestellten Bauelement ist das auch nicht zu erwarten. Die größten Probleme werden langfristig beim Wandanschluss der Elemente erwartet. In diesem Fall ist aber eine Sanierung leicht möglich und preiswert durchführbar.



Abb. 28 Beispiel für günstige Integration des Tauschers mit Banketten

2 Wärmeanlagenbetrieb

Im Gegensatz zur vereinfachten Auslegung des Anteils der Wärmepumpe an der Gesamtheizleistung berechnet sich der Anteil bei der Wärmemengenbereitstellung und der Anlagenauslegung eines konkreten Gebäudes etwas aufwendiger. Aufgrund der Abhängigkeiten nicht nur von der Außenlufttemperatur, sondern auch von der Abwassertemperatur und Abwassermenge muss der Wärmemengenanteil und der optimale Leistungspunkt nicht ein-, sondern mehrfaktoriell ermittelt werden. Bei einem Doppelbetrieb mit Kälteerzeugung ist auch der Jahresauslastungsanteil jeweils für Wärme auf der einen und für Kälte auf der anderen Seite getrennt zu optimieren.

Eine Verlängerung der Gewährleistungsfrist durch den Hersteller der Anlage auf mindestens 10 Jahre wird für diesen kein Problem sein. Eine Gesamtlebensdauer von deutlich über der regulären Abschreibungsdauer der Abwasseranlagen von Freiburg (1,5% pro Jahr = 66 Jahre) kann mit großer Sicherheit ohne technische Einschränkungen für den Kanalbetrieb eingehalten werden.

Selbst wenn der Wärmetauscher wegen mangelnder Nachfrage später einmal nicht mehr zur Abwärmenutzung verwendet wird, verliert die Einrichtung für den technischen Betrieb der Anlage im Fall einer Auslegung als Niedrigwasserrinne mit ein- oder zweiseitigem Bankett nicht vollkommen an Wert. Zumindest braucht der Wärmetauscher in aller Regel mit Ausnahme der Zu- und Ableitungen nicht wieder ausgebaut zu werden. Wenn letztere nicht im offenen Querschnitt des Kanals geführt sind, sondern, wie empfohlen, außen zu liegen kommen, kann der Kanal auf unbestimmte Zeit unverändert in seiner Lage verbleiben.

Am Beispiel des Projektentwurfes zum Baugebiet Güterbahnareal Nord wurden zudem verschiedene Ausbaustufen berücksichtigt. Leider müssen bei Baugebieten große Investitionen unter unsicheren Entwicklungsbedingungen für lange Laufzeiten gebunden werden. Die Problematik trifft aber im gleichen Umfang für alle anderen zentralen Wärmeanlagen in ähnlicher Weise zu.

Ein Baugebiet wie das Güterbahnareal Nord wird über einen längeren Zeitraum bis über 15 Jahre entwickelt. Der Spitzenwärmebedarf steigt

Luft [°C]	-8	-1	0	3	5	7	10	12	14	14	20	26	30
Abwasser [°C]	12	13	14	15	15,5	16	17	18	19	19	22	24	24

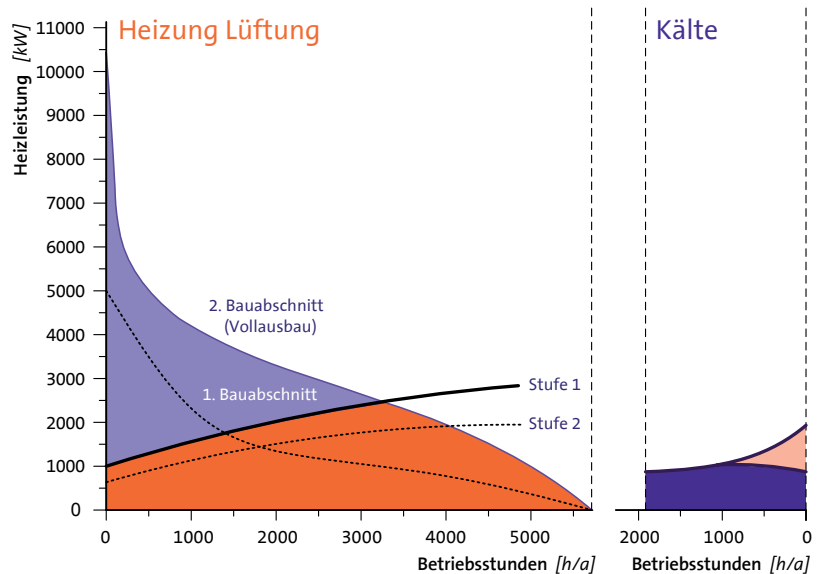


Abb. 29 Jahresdauerlinie u. Auslegung Wärmepumpe für zentrales Wärmeverorgungsnetz Baugebiet Güterbahnareal Nord Freiburg



mehr oder minder kontinuierlich. Die Pumpenanlage und die restliche Anlage können nur in wenigen Stufen ausgebaut werden. Die Auslastung der Wärmepumpenanlage verlagert sich bei zunehmender Bebauung und wachsender Wärmenachfrage auf die Kesselanlagen. Der optimale Auslastungspunkt wird erst spät erreicht.

Es ist denkbar, dass eine Regelung des Wärmepumpenbetriebes abhängig von der augenblicklichen Menge und Temperatur des Abwassers sinnvoll ist, um die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe zu verbessern. Voraussetzung dafür ist in jedem Fall eine großzügig dimensionierte Wärmepufferung oder ggf. sogar ein Latentspeicher.

Das mit der Evaluation der Technik beauftragte, Schweizer Ingenieurbüro konnte keine Langzeitmessreihen zum laufenden Betrieb einer Anlage vorlegen. Entsprechend findet sich keine Praxisbestätigung der erwarteten Jahresleistungszahlen.

Die von Diplomand Stefan Schwörer durchgeführten Betriebsmessungen bestätigen aber die erwarteten Leistungszahlen. Jedoch nur für den eingeschränkten Zeitraum von 4 Monaten.

Das von ihm untersuchte Objekt in Singen weist aber keine optimalen Wirtschaftlichkeitsbedingungen auf, weil der prognostizierte Wärmebedarf (noch) nicht erreicht ist. Die Auslastung der Gesamtanlage ist ungewöhnlich gering.

Für den normalen Betrieb der technischen Anlagen wie Wärmepumpen, Kesselanlagen usw. gelten keine abweichenden Bedingungen zu Anlagen konventionellen Typs.

Das Zusammenwirken von verschiedenen Heizungsarten kann hier nur abgeschätzt werden.

Nach gegenwärtigem Erkenntnisstand gelten die gleichen Betriebsempfehlungen wie für Erdwärmennutzungsanlagen und

Blockheizkraftwerke.

Die Brauchwassererzeugung ist aufgrund der mäßigen Wirkungsgrade im Hochtemperaturbereich durch Wärmepumpentechnik nur im kleinen Umfang sinnvoll. Da die Kanalwärmenutzung erst ab Anlagen von mindestens 450 kW Wärmeleistung sinnvoll ist, kann die Bereitstellung von Warmwasser effizient durch konventionelle Kessel, Fernwärme oder unter Umständen durch Solarthermie erfolgen.

Die Betriebsweise im Heizungsverbund ist nicht näher untersucht. Mit Blick auf die möglichen Wirkungsgrade, die Preisentwicklung für hochwertige Energieformen wie Strom und die Vorteile, dezentraler Energiebereitstellung ist es absehbar, dass Koppelprodukte wie Heizwärme im Winter und Kälte im Sommer durch Wärmepumpentechnik generell preisgünstiger erzeugt werden können, als konventionelle Anlagen mit Brenner und Luftkondensatoren.

Durch die Kraft-Wärmekuppelung wird die Gesamtauslastung der Anlage optimiert. Es kann auf die langjährigen Erfahrungen beim Betrieb von Blockheizkraftwerken zurückgegriffen werden.

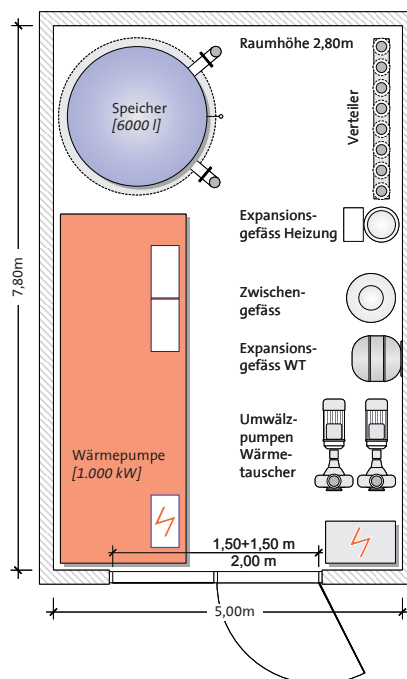


Abb. 30 Raumbedarf 1.000 kW Wärmepumpenanlage

Für die Verteilung der Risiken beim Betrieb der Anlagen gelten bei der Kanalwärmenutzung keine besonderen Bedingungen. Die Bereitstellung von Abwasser ist sicherlich langfristiger garantiert als jede andere Art der Energiebereitstellung in Form von Strom, Gas oder Öl.

Der Raumbedarf für eine einfache Wärmepumpenanlage für die Kombination mit bereits bestehender Heizanlagentechnik oder einem Fernwärmeanschluss ist verhältnismäßig gering. Für den Fall, dass einfach eine Anlage beigestellt werden soll, sind ca. 40 m² erforderlich. Für eine entsprechende Schalldämmung einer gasbetriebenen Kompressionswärmepumpe ist besonders Sorge zu tragen.

3 Nutzung Synergien

Während die Kanalnetzbetreiber in den meisten anderen Städten aus betriebswirtschaftlichen Erwägungen heraus nur noch in besonderen Fällen die Kanäle erneuern, ist diese Form der Sanierung in Freiburg die Regel. Unter diesen Bedingungen ist deshalb der Einbau eines Wärmetauschers bereits bei der Rohrfertigung besonders preiswert und qualitativ hochwertig möglich. Die Chancen für eine wirtschaftliche Investition verbessern sich dadurch für den Heizungsbetreiber wesentlich.

Es ist sogar denkbar, dass ein Teil der Investition für den Einbau der Niedrigwasserrinne über Abwassergebühren finanziert wird. Nämlich um den Differenzbetrag zwischen Standardkanalrohren ohne Niedrigwasserrinne und mit Niedrigwasserrinne.



Abb. 31 Für nachträgliche Installation eines Wärmetauschers ungeeigneter moderner Rohrquerschnitt

Moderne Rohre sind statisch wie hydraulisch mit möglichst geringem Materialeinsatz wie im gezeigten Beispiel optimiert. In diesem Fall sind natürlich gar keine Synergien möglich.

Bei den größeren Rohren in Freiburg ist es jedoch nach wie vor die Regel, dass die Rohre als Standardelemente geschalt und erst nachträglich mit einer Rinne ausgestattet werden. Es entstehen dadurch Mehrkosten von bis über 300 EUR pro Laufmeter. Insgesamt steht preislich der Aufwand für die Verlegung von Rohren weit vor dem Materialmehreinsatz.

Die Gestaltung der Rinne mit Edelstahl ist in diesem Sinne in jedem Fall eine besonders hochwertige Form der Niedrigwasserrinnenausbildung.

Einfach ist auch der Einbau bei abwassertechnischen Anlagen, die in geschlossener Bauweise mittels Vorpresseung oder im Minnintunnelverfahren erstellt werden. In diesen Fällen muss regelmäßig mit größeren Rohrdimensionen als

hydraulisch erforderlich vorgetrieben werden. Zur Vermeidung von Ablagerungen wird dann nachträglich ein Drachenprofil oder eine klassische Rinne mit Bankett eingebaut.

Entscheidend für den Erfolg eines Projektes ist die frühzeitige Integration von Energieplanung und Abwasserplanung. Am Projekt Güterbahnaerial Nord bestanden hierzu günstige Voraussetzungen. Durch einen geänderten Verlauf der Hauptkanalisation können die Anforderungen an die zentrale Bereitstellung von Kanalwärme und zugleich die Anforderungen der Sanierung eines Altkanals und die sinnvolle Neuerschließung des Baugebietes realisiert werden.

In der Funktion als Generalplaner und -Unternehmer sind im Haus badenova AG & Co. KG alle Planungs- und Projektleitungsbedingungen gegeben, um ein Projekt erfolgreich einzuleiten.



Abb. 32 Anpassung von Kanalerschließungsplanung und Wärmenutzung (Beispiel Projekt Güterbahnaerial Nord in Freiburg)



D ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG

Die Kanalwärmenutzung hat wie andere Verfahren der Wärmerückgewinnung das Ziel möglichst effizienter Nutzung bereits vorhandener Wärmeressourcen. Sie verfolgt demnach in konsequenter Form das Recyclingprinzip im Sinne des nachhaltigen Umgangs mit begrenzten Energiereserven. Aufgrund der Gesetzmäßigkeiten der Entropie ist Wärmerückgewinnung nur sehr begrenzt möglich. Grundsätzlich müssen bis auf Weiteres besonders hochwertige Energieformen wie Gas oder Strom verbraucht werden, um aus der rückgeführten Wärme auf niedrigem Temperaturniveau wieder eine höherwertige, also höher temperierte Heizwärme zu gewinnen.

Bei der folgenden Bewertung ist der Ressourcenverbrauch zur Herstellung der Anlage an sich nicht berücksichtigt. Davon abgesehen ist aber die Frage nach Sinn oder Unsinn der Wärmepumpentechnik mit Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser bei zunehmender Erschöpfung der fossilen Energiereserven der Erde unzweifelhaft positiv entschieden.

Auch mit langfristig wirtschaftlicher Perspektive ist die zeitgemäße, dezentrale Wärmeverwertung vorteilhaft. Unter ökologischen und humanistischen Gesichtspunkten ist die Verschwendung der Ressourcen Öl und Gas nicht nur unsinnig, sondern dem Wesen nach ein Vergehen an den Kindern. Gleich welche Prognose für den Ressourcenverbrauch und für die Ressourcenendlichkeit herangezogen wird: Es steht unbestritten fest, dass der Peak Oil erst noch bevorsteht und dass das Ende der Verfügbarkeit von fossilen Energieträgern noch innerhalb der beiden nächsten Generationen bevorsteht.

Das Instrumentarium alternativer Energiebereitstellung steht bereits in wichtigen Teilen zur Verfügung. Aber auch zukünftig wird auf bislang nicht absehbare Zeiten ein hoher Bedarf an fossilen Roh- und Brennstoffen erforderlich sein, um die Energiebereitstellung zu sichern.

Umgekehrt wird die Erwärmung der Gewässer und offensichtlich auch des Grundwassers ein ernst zu nehmendes ökologisches Problem. Der Umweltschutz hat sich in der Vergangenheit vor allem auf die stofflichen Einträge beschränkt. In der nächsten Generation ist auch die Frage des Energieüberangebotes zu bewältigen.

Durch eine einfache Summation der Wirkungsgrade von Wärmegewinnungsanlagen berechnet sich eine einfache und eindeutige Abfolge der Effizienz von Wärmanlagen.

Nachfolgendes Schaubild geht von vorsichtigen Arbeitszahlen bei der Wärmerückgewinnung aus. Unter der Annahme, dass aus dem Kanal gegenüber den Leistungszahlen von Pumpenanlagen mit Erdwärme in der Regel höhere Temperaturen verwertet werden können, verbessert sich dementsprechend die Effizienz von Wärmepumpenanlagen um bis zu zusätzlichen 20 %.

Nochmals verbessert sich die Bilanz, wenn die Erzeugung von Kälte für den Sommer hinzugerechnet wird. Es ist mit einer spürbaren Entlastung des Primärenergiebedarfs gegenüber konventioneller Kältetechnik überwiegend mit Stromkompressionswärmepumpen und Luftkollektoren zu rechnen.

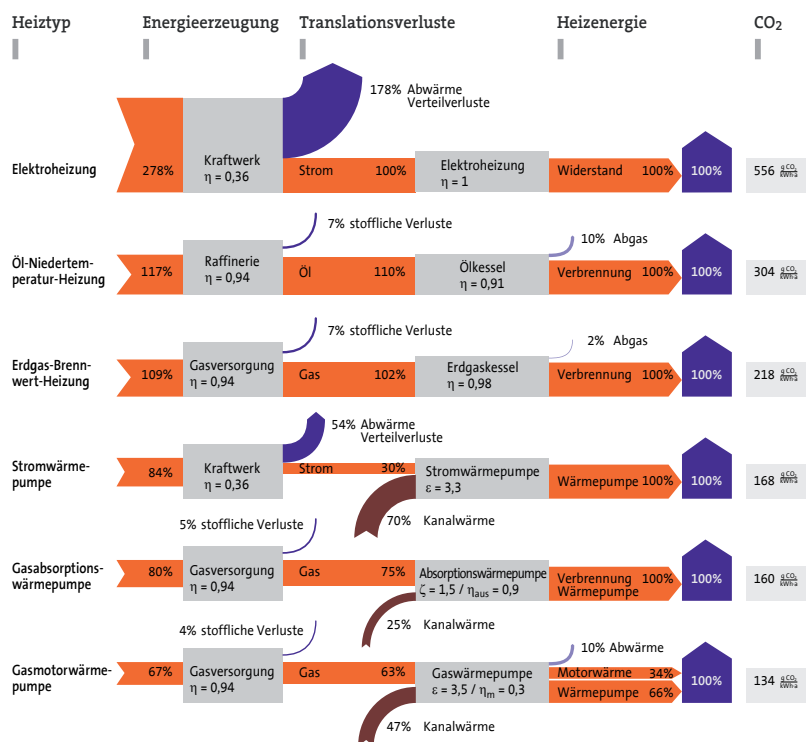


Abb. 33 Primärenergieverbrauch Vergleichstabelle



Für den Vergleich an atmosphäreschädigenden Stoffen wird ein Standardszenario von üblichen Heiztechniken zusammengestellt. Berücksichtigt sind die Aspekte vorgelagerter Prozesse und Transporte sowie die Prozesse bei der Energietransformation und -translation und der Entsorgung nach der GEMIS Emissions-Bilanz des Öko-Instituts Freiburg.

CO₂-Äquivalent: Aggregation von Treibhausgasen (CO₂, CH₄, N₂O, Perflourmethan, Perflouraethan)

SO₂-Äquivalent: Aggregation von sauren Luftschadstoffen (SO₂, NOX, HCl, HF, NH₃, H₂S)

TOPP-Äquivalent:

Troposphärischer Ozon-Vorläufer-Äquivalent (Massenbezogenes Äquivalent der Bildung von bodennahem Ozon durch Vorläufersubstanzen, die für die bodennahe O₃-Bildung verantwortlich sind und somit zum Sommersmog beitragen. Relative Ozonbildungsrate der Luftschadstoffe CO, NMVOC, NOX, CH₄)

Der Strommix wurde unter den Verhältnissen in Deutschland und in der Schweiz berücksichtigt.

Die Diplomarbeit von Frau Oppold [2004] beschäftigt sich ausführlich mit der Ökobilanzierung.

In der folgenden Grafik wurden die Ergebnisse ihrer Untersuchung auf Standardanlagentypen übertragen. Um die tatsächlichen Lastverhältnisse im Anlagenbetrieb realistisch abzubilden, wurde auch der bivalente Betrieb mit einem Gas-Spitzenlastkessel zur Abdeckung von insgesamt 20% des Bruttojahresheizenergiebedarfes zugrunde gelegt.

Durch die naturverträglichere Erzeugung von Strom in der Schweiz verhält es sich beim Betrieb von strombetriebenen Kompressionswärmepumpen dort günstiger als in Deutschland.

Zwischen den Angaben über ökologisch relevante Schädigungsfaktoren gibt es zwischen den verschiedenen Autoren von Bericht

zu Bericht teilweise einige Abweichungen. In der Tendenz sind die Ergebnisse aber ähnlich.

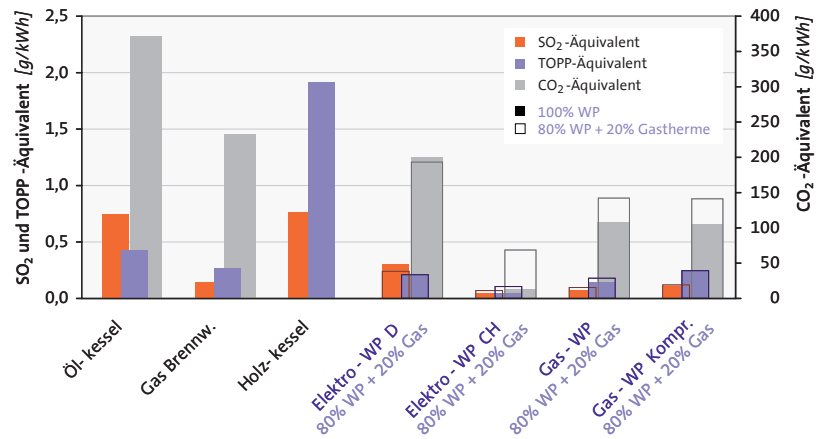


Abb. 34 Standardvergleich treibhauswirksame Stoffe, Schwefeldioxid und Kohlendioxidausstoß von Heizanlagen
(Ausgewählte Beispiele von Anlagentypen mit deutschem und schweizerischem Strommix)

Die Nutzung von Kanalwärme mit elektrobetriebener Kompressionswärmepumpe wurde auch bei Varianten der Heiztechnik bei der Energiestudie zum Baugebiet Güterbahnareal Nord berücksichtigt.

Unter realistischen Bedingungen wurde durch Ingenieurbüro eproplan [2003] ein Gesamtwärmeenergiebedarf von ca. 20.600 MWh/a für Heizzwecke und 2.600 MWh/a für Brauchwasserbereitung errechnet. Der notwendige Spitzenbedarf an Heizleistung wurde im Endausbau einer fiktiven Zentralwärmanlage auf 11.300 kW geschätzt. Für die unterschiedlichen Heizanlagen liegt ein differenziertes Energiekonzept mit Szenarien der Heizungstechnik zugrunde.

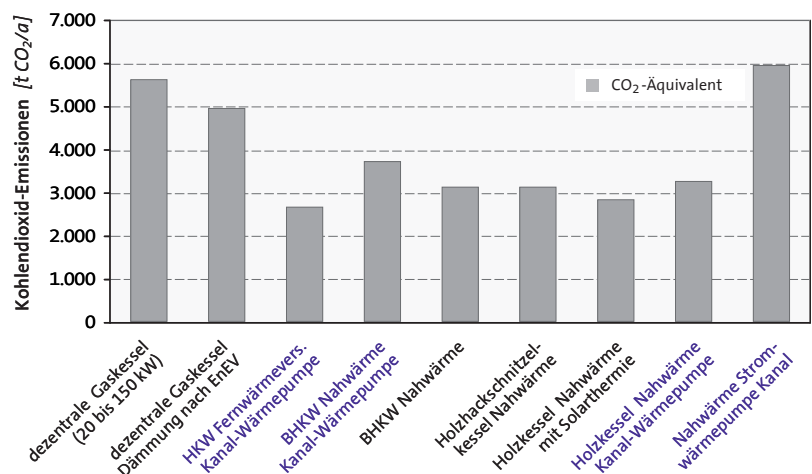


Abb. 35 Kohlendioxid-Emissionen der verglichenen Wärmeanlagentypen
(CO₂-Äquivalente mit deutschem Strommix am Beispiel Projekt Güterbahnareal, 23.000 MWh/a, 11.300 kW Spitzenleistung)

Wärme aus Abwasser

Technik und Potenzial in Freiburg i.Br.



Obwohl für die Wärmepumpentechnik der Strombetrieb mit deutschem Strommix und keine Kälteerzeugung berücksichtigt wurden, schneidet der Betrieb mit Wärmepumpe in allen Disziplinen grundsätzlich nicht schlechter ab als die Alternativen. Interessant ist die Variante mit bivalentem Betrieb zusammen mit Fernwärmeversorgung aus dem benachbarten Rhodiaareal.

Entgegen verschiedenen Werbungen zum Thema, bedeutet die Abwasserwärmenutzung aufgrund der maßgeblichen Fremdenergieanteile zur Transformation auf höhere Temperaturniveaus keine sicherere und unabhängige Energieversorgung als andere, vergleichbare Techniken mit Wärmepumpen.

In diesem Sinne besteht auch keine konkrete Veranlassung, auf eine allfällige CO₂-Abgabe zu verzichten.

In den vergangenen 4 Jahren wurde die hohe Temperaturbelastung der Gewässer zu einem schwerwiegenden Problem. Regelmäßig droht über die Sommermonate den Lebensgemeinschaften in Flüssen und Bächen der Kollaps, weil die Gewässer durch die verschiedenen Kühlprozesse weit über das natürliche Maß hinaus erwärmt werden.

In diesem Sinne ist die systematische Aufheizung des Abwassers grundsätzlich nicht begrüßenswert. In wie weit andere Wärmenesenken wie Grundwasser und Boden sich in diesem Sinne toleranter erweisen, ist noch unklar.

Diese Einzelaspekte ändern jedoch nichts am grundsätzlichen Vorteil eines Systems, bei dem Wärme rückgewonnen, d.h. der Umwelt wieder entzogen, und nicht nur einfach weiter durch verheizen von fossilen Energieträgern freigesetzt wird.

Das Prinzip kann am Gesamtenergieflussschema des Energiekonzeptes für das geplante Erschließungsgebiet Güterbahndareal Nord in Freiburg deutlich gemacht werden (vergleiche auch Diagramm Abb. 32). Der notwendige Heizbedarf der Gebäude wird zu ca. 60% aus konventionellen Energieträgern Gas und Strom gedeckt, der Rest aus „Wärmerecycling“. Um eine positive Gesamtbilanz zu erzielen, sollte allerdings die Wärmepumpe entgegen dem Konzept der vorliegenden Energiestudie mit Gas betrieben werden, weil der Primärenergiebedarf für die Erzeugung des Stroms zu hoch ist.

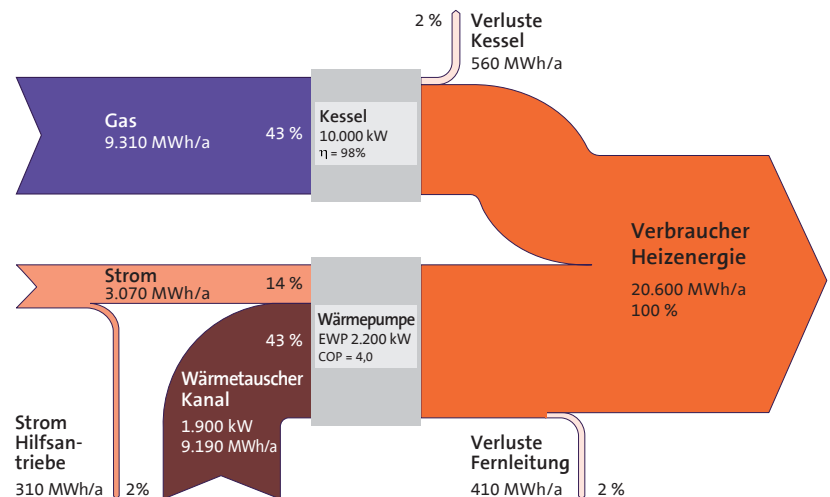


Abb. 36 Gesamtenergiebilanz / Energieflussschema (Beispiel Projekt Güterbahndareal Nord in Freiburg)



E WIRTSCHAFTLICHKEIT

Während die Unbedenklichkeit und der allgemeine ökologische Nutzen der Wärmerückgewinnung aus Abwasserkanälen in mittlerweile zahlreichen Publikationen in ähnlicher Form immer wiederholt werden, ist der wirtschaftliche Aspekt bei allen Betrachtungen, wenn überhaupt, stets vage formuliert.

Der Grund hierfür ist einfach: Zum einen ist es allen Beteiligten klar, dass es bei „alternativen“ Formen der Heiztechnik bei den augenblicklich noch moderaten Preisen für Gas, Öl und Strom durch die höheren Investitionskosten schwer ist, mit den preiswerten Standardkesseln der Heiztechnik zu konkurrieren. Besonders dann, wenn die Technik der Wärmepumpe unmittelbar und unter gleichen haustechnischen Randbedingungen mit konventioneller (Hochtemperatur) Heiztechnik konkurrieren muss, sind die Grenzen der Wettbewerbsfähigkeit schnell erreicht. Zum anderen ist es sicherlich auch der Mangel an verlässlichen Betriebs- und in der Folge Wirtschaftsdaten zur Wärmepumpentechnik im Allgemeinen und der Wärmetauschertechnik für Kanalnetze im Speziellen.

Um bei der Potenzialabschätzung das wichtige Kriterium Wirtschaftlichkeit realistisch einzuschätzen, wurde bei vorliegender Studie folgender einfacher Ansatz gewählt. Die Kanaltrassen, die einen Mindesttrockenwetterabfluss von $Q_T = 15 \text{ l/s}$ aufweisen, wurden auf Grundlage der nach Einwohnergleichwerten haltungsweise nach dem Rechenverfahren HYSTEM-EXTRAN ermittelten Daten des Generellen Entwässerungsplanes der Stadt ausgewählt und im Geografischen Informationssystem kartiert. Zur näheren Bestimmung der Randbedingungen und für den Eintrag der Zu- und Ableitungen zwischen Kanaltrasse und Heizzentrale wurden die Daten in

einem CAD-Programm weiterverarbeitet.

Für die Stadt Freiburg wurden entlang den zur Wärmenutzung geeigneten Kanälen ganz konkret die potenziellen Kanalwärmenutzer ermittelt. Wegen der Mindestvorgabe an Anlagengröße und nach Möglichkeit ganzjährigem Anlagenbetrieb kamen bevorzugt öffentliche Einrichtungen in die engere Wahl.

Die Anstalten und größeren Gebäude wurden entlang diesen „Kanalenergiestrassen“ kartografisch ermittelt und mit ihrem Abstand und möglichen Anschluss an einen Kanal dargestellt. Insgesamt kamen 29 Anlagen in die engere Wahl.

Der beauftragte Energieingenieur ermittelte, soweit verfügbar, die tatsächlich installierte Wärmeleistung und den Energieverbrauch dieser Gebäude.

Für die Anlagen wurden nach einer einheitlichen Tabelle die notwendigen Komponenten und die Investitions- und Betriebskosten dafür zusammengestellt.

Es wurden nur bereits vorhandene Wärmenutzer betrachtet. Die nach neuem Flächennutzungsplan ausgewiesenen Baugebiete konnten noch nicht berücksichtigt werden, weil für die Bebauung zum Zeitpunkt der Untersuchung noch keine Bebauungsparameter wie Art der Nutzung und Grundflächenzahl vorlagen. Davon abgesehen ist das gewählte Modell zur Ermittlung der Wärmegegestehungspreise nur bedingt auf ganze Baugebiete übertragbar.

Sämtliche Eingangsgrößen finden ihren Eingang in Einzelzusammenstellungen für jede Anlage. Die Gesamtauswertung erfolgt nach einheitlichem Muster in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2067 unter Berücksichtigung der Amortisation und der Verzinsung.

Investitionskosten

Die Installationskosten für die Wärmepumpe wurden mit Preisbezug auf die KW-Nennleistung geschätzt.

Der Leitungsbau wurde nach laufenden Metern für befestigte und unbefestigte Leitungsabschnitte nach Preisen für Wasserleitungen beziffert. Der Pufferspeicher wurde als Standardeinrichtung mit 1.000 EUR/m^3 berücksichtigt.

Der Kanalwärmetauscher wurde zunächst nach Preisen des Herstellers Rabtherm (Schweiz) eingeschätzt. Die aktuellen Preise sind mit dem Markteinstieg der Firma Uhrig aus Geisingen geringfügig gefallen. Unter dem Grundsatz der kaufmännischen Vorsicht wurden keine Synergieeffekte z.B. durch vorhandene Baugruben und fällige Auswechslungen des öffentlichen Abwassersammlers berücksichtigt. Ein Abschlag kann aber bei einer Einzelprojektierung ggf. berücksichtigt werden.

Eine Umstellung von Nischenradiatoren oder Deckenstrahler auf Fußbodenheizkörper ist aufgrund der hohen Investitionen nur in besonderen Fällen rentabel. Über die Neuinstallation von Heizkörperventilen lässt sich aber die Vorlauftemperatur vieler vorhandener Anlagen absenken, weil die Heizkörper in der Vergangenheit tendenziell überdimensioniert wurden. Der Preis dafür wird berücksichtigt.

Die weiteren Kostenparameter sind gebräuchlich und berücksichtigen möglichst umfassend alle Investitionskosten.

Über den Zinssatz lässt sich bekanntlich gut streiten. Lohnenswert ist die Diskussion der Abschreibungsfristen. Beim Modell wurden die üblichen



Abschreibungsfristen für Wärmeanlagen berücksichtigt. Eine geteilte Abschreibung der Wärmetauscher ist dann interessant, wenn diese Anlage nicht zwangweise durch den Heizungsanlageninvestor gebaut und finanziert werden muss. Es gilt als sicher, dass die gebrauchsgewöhnliche Nutzungsdauer der Wärmetauscher, sowie die der Zu- und Ableitung bedeutend länger ist, als der Rest der maschinentechnischen Ausrüstung. Mit einem starken Wertverfall ist, wie generell beim öffentlich finanzierten Wasserleitungs- und Kanalbau, eher nicht zu rechnen. Eine Nutzungsdauer von über 50 Jahren ist realistisch.

Betriebskosten

Die Betriebskostenparameter wurden bei den Modellansätzen nur wenig variiert. Lediglich die Reinigungskosten für die Wärmetauscher im Kanal haben einen nennenswerten Einfluss auf die Gesamtwirtschaftlichkeit der Anlage.

Verbrauchskosten

Die Verbrauchskosten beziehen sich auf Energiepreise der badenova AG & Co. KG mit Stand von 2004. Die Variierung ist natürlich von dominanter Bedeutung für die Gesamtgestehungskosten der Wärme. Bei einer Konkretisierung eines Projektes sind diese Randbedingungen hinsichtlich Auswahl der Lieferanten und der Mengenpreise im Einzelfall anzupassen.

Die Wärmeübertragungsleistung der Kanalwärmetauscher und die Arbeitszahl der Wärmepumpe sind ebenfalls von überragender Bedeutung für den Wärmegehaltungspreis. Diese Parameter wurden zur Fertigung des Schlussberichtes nochmals untersucht und nach neuen Erkenntnissen differenziert. Es wurde fernerhin die

Variante einer gasbetriebenen Wirtschaftsweise mit aufgenommen.

Die Kosten für die Anlagenteile sind mitunter nur abschätzbar. Sie wurden deshalb zusammen mit diesem Schlussbericht den aktuellen Zahlen angepasst. Wie sich aber leicht ausprobieren lässt, sind die Gesamtwirtschaftszahlen gegenüber den Einzelkosten der Anlage verhältnismäßig robust. Die Ergebnisse werden nicht zuletzt deshalb als realistisch eingestuft.

Das Ergebnis der Anlagenberechnung sind insgesamt 22 Preisermittlungen zu den Gesamtjahreskosten und den spezifischen Wärmegehaltungskosten pro Megawattstunde Wärme, wie er z.B. durch einen Investor und Anlagenbetreiber wie badenova als Kontraktor gegenüber dem Wärmenutzer mit einem Zuschlag für Gewinn und Risiko angeboten werden könnte.

Bei der Darstellung des Mittelpreises wurden nur Anlagen berücksichtigt, die innerhalb der Standardabweichung des Preises liegen.

Das Ergebnis der Auswertung für Freiburg ist im Folgenden summarisch zusammengefasst.

Spez. Erzeugungskosten berücksichtigter Anlagen unterhalb Standardabweichung	62,4 EUR/MWh
Günstigster spezifischer Erzeugungspreis (FT Schwimmbad, Freiburg-Waldsee)	44,7 EUR/MWh
Anzahl berücksichtigte Anlagen	12 St
Period. Gesamterzeugungskosten berücksichtigter Anlagen unterh. Standardabweich.	39.100 EUR/a
Durchschnittlich gebundenes Kapital	30.600 EUR/a
Geforderte Mindestrentabilität	7,0 % p.a.
Preisforderung gemäß Mindestrentabilität	41.240 EUR/a
Preisforderung pro Megawattstunde Wärme gemäß Mindestrentabilität	65,8 EUR/MWh
Mittlere periodische Energiekosten (Stand 2004)	5.740 EUR/a
Anteil Energiekosten an period. Gesamterzeugungsk.	14,7 %
Mittlere periodische Betriebskosten	2.350 EUR/a
Anteil Energiekosten an period. Gesamterzeugungsk.	6,0 %
Mittlere Länge Kanalwärmetauscher	70 lfm

Tabelle 4 Wirtschaftlichkeit der potenziellen Wärmeanlagen zur Kanalwärmenutzung in Freiburg

Wichtige, das heißt, den Preis maßgeblich bestimmende Faktoren, wurden auf Grundlage des vorliegenden Datenmaterials nach den gleichen Kriterien wie zuvor genannt variiert. Dadurch ist der absolute Gestehungspreis besser einschätzbar und es wird erkenntlich, an welcher Stelle Optimierungspotenzial besteht.

Wichtig ist vor allem die Einschätzung, ob überhaupt noch Potenziale bestehen, um die Anlagen unter betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten zu optimieren.

Wärme aus Abwasser

Technik und Potenzial in Freiburg i.Br.

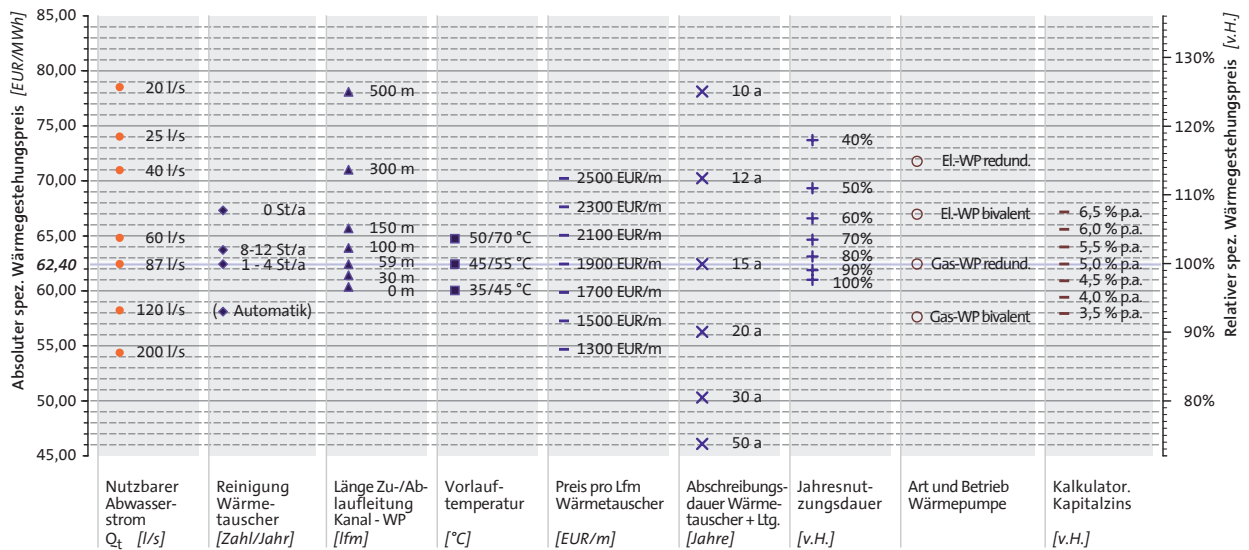


Abb. 37 Abhängigkeit spezifischer Wärmegestehungspreis von wesentlichen Wirtschaftsfaktoren

Unter den untersuchten Faktoren wurden neun maßgebliche für die Darstellung ausgewählt.

rechnen sind, zählt bei der Investitionsentscheidung für einen Investor und Contractor zunächst überwiegend der Vergleichspreis zum aktuellen Preisniveau.

1 Größe der Anlage

In den Empfehlungen zu Wärmeanlagen wird wiederholt darauf hingewiesen, dass die Investitionen erst ab einer gewissen Mindestgröße der Anlage von ca. 200 kW rentieren. Die Ursache dafür sind die hohen Investitionen für die Installation der Wärmetauscher, der Zuleitungen und der Wärmepumpe, die in den meisten Fällen zusätzlich zu den üblichen Kesselanlagen gebaut werden müssen. Der Preis pro kW-Leistung fällt mit zunehmender Größe der Anlage. Bei großen Anlagen ist zudem der relative Wartungs- und Betriebsaufwand geringer als bei Kleinanlagen.

Die neue Anlage muss den Kostenvorteil langfristig durch im Vergleich zur konventionellen Anlage geringere Verbrauchs- und Betriebskosten hereinspielen. Obwohl mit laufenden Preissteigerungen bei den Primärenergieträgern Holz, Öl, Gas und Strom zu

Der Zusammenhang von Anlagengröße und Wärmegestehungskosten der Anlage kann auch für die ausgewählten Heizungsanlagen von Freiburg nachgewiesen werden. In der folgenden Grafik sind die absoluten Jahreskosten aus Kapitalkosten, Betriebskosten und Energiekosten (Vollkosten) logarithmisch über der Heizleistung bzw. über der produzierbaren Nutzwärme aufgetragen. Letztere beide Größen verhalten sich zwar nicht streng linear zueinander, für die Darstellung der Zusammenhänge ist aber der gleiche Bezug im Durchschnittskostenbereich der Anlagen hinreichend genau.

Die Kapitalkosten verhalten sich zur Anlagengröße proportional linear. Die Betriebskosten fallen etwas ab und die Bedeutung der Energiekosten nimmt bei größer werdenden Anlagen überproportional zur der Kapitalbindung zu. Die mehr oder minder starken Abweichungen von der Regressionsgeraden rühren von den unterschiedlichen Bedingungen für die Kanalwärmegewinnung: Die Erschließungswege und die Wärmetauscherdimension sind besonders stark von der örtlichen Situation des Abwasserdargebots und der Entfernung des nutzbaren Kanals abhängig. Die relative Häufung der ausgewählten Anlagen im Durchschnittsleistungsbereich der Anlagen von ca. 900 MWh Jahresleistung bzw. 650 kW Nennheizleistung rührt natürlich daher, dass bei der Untersuchung in diesem Leistungssegment bevorzugt nach potenziellen Anlagen gesucht wurde.

Auf der Skala rechts dargestellt ist der spezifische Wärmegestehungspreis in EUR/MWh (nicht logarithmisch skaliert). Beim errechneten Mittelwert dieses Preises in Höhe von 62,40 EUR/MWh müssen jährlich ca. 40.000 EUR für Kapitalkosten, Betriebs- und Energiekosten aufgebracht werden.

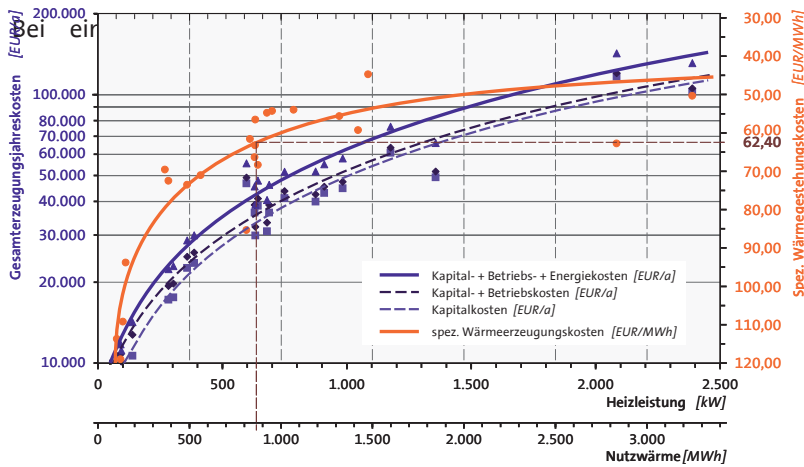


Abb. 38 Abhängigkeit Spez. Wärmegestehungspreis von Anlagengröße (Heizleistung, Jahresnutzwärme) (Potentielle Kanalwärmennutzungsanlagen für Freiburg)

unterhalb von 400 MWh fällt die Preiskurve sehr stark ab. Das heißt, der Preisanstieg für die Wärme ist überproportional zunehmend.

Damit bestätigt sich die Empfehlung für die Mindestgröße der Anlage. Für Freiburg kann sie dahingegen präzisiert werden, dass Anlagen erst deutlich über 400 Wh/a (300 kW) sinnvoll sind.

Auf dem Marktsegment der Wärmepumpentechnik werden einige Entwicklungen erwartet. Die Nachfrage dafür ist stark expansiv. Das Potenzial an technischen Optimierungen zum Nutzwert betreffend Wirkungsgrad, Langlebigkeit und Unterhaltsfreundlichkeit ist noch groß. Die Gewinnmarge der Hersteller steigt jährlich so sicher, wie der Gaspreis wächst. Bei zunehmendem Wettbewerb wird voraussichtlich auch der Preis für die Anlagen wieder zugunsten der Investoren fallen. Dieser wird die fallenden Preise durch die vertragliche Preisbindung über den regulären Abschreibungszeitraum hinweg zunächst nur bedingt an den Verbraucher weitergeben.

Das größte Entwicklungspotenzial wird bei der Kombination bei mittleren bis großen Anlagen im bi- oder sogar trivalenten Betrieb erwartet. Durch intelligenten

Elektrowärmepumpen, wie im nächsten Abschnitt beschrieben, ermittelt.

Danach bewegt sich die Abweichung der Kosten im Rahmen von ca. 5 EUR/MWh. Damit wird deutlich, dass der Umbau einer bestehenden Heizungsanlage mit erforderlichen, hohen Vorlauftemperaturen in der Regel kaum rentiert, sofern nicht sowieso eine Totalrenovation des Gebäudes ansteht. Lediglich geringe Anpassungen wie das Austauschen der Heizungstemperaturregler usw. sollten regelmäßig in die Kalkulation mit eingehen.

Länge Zu-/Ableitung Wärmetauscher

Im Vergleich zu den anderen Komponenten der Heizungsanlage mit Kanalwärmennutzung fällt die zu überwindende Strecke zwischen Kanal und Heizungszentrale finanziell nicht allzu sehr ins Gewicht, sofern keine echten Hindernisse auf dem Weg liegen. Die bei den untersuchten Anlagen festgestellte, mittlere Erschließungslänge beträgt 59 m. Bei Gebäuden mit Entfernungen von über 300 m wurden nicht berücksichtigt. Gemäß Investitionsrechnung ist ein Erschließungsradius von bis zu 200 m sinnvoll. Dieses Ergebnis wird durch die Einschätzungen anderer Autoren bestätigt.

Die Unterkreuzung eines Flusses, (wie in Offenburg konkret untersucht,) oder die Umgehung einer ganzen Bebauung, schließen sich in aller Regel aus. In vielen Fällen kann aber mit Synergien bei der Verlegung der Leitungen zusammen mit anderen Infrastrukturleitungen gerechnet werden. Das trifft ganz besonders für den Fall zu, dass der öffentliche Kanal saniert werden muss.

Preis der Wärmetauscher

Die Hoffnungen, mit der Erfindung von Kanalwärmetauschern Geld zu verdienen, haben sich offenbar in der Wirklichkeit noch nicht erfüllt. Es gibt Hinweise darauf, dass der Entwicklungs- und Marketingaufwand der anbietenden Firma Rabtherm mit Blick auf die Größe und Finanzkraft der Firma überdimensional waren.

Mehrfachbetrieb entweder von Kälte, Wärme und/oder Strom werden Spitzenauslastungen mit niedrigen Taktzahlen erzielt.

2 Anlagenausbau

Vorlauftemperatur

Die notwendigen Vorlauftemperaturen wurden bei der Preisbestimmung der mittleren, spezifischen Wärmevervollkosten berücksichtigt. (Siehe Diagramm zum spez. Wärmegestehungspreis.) Die notwendige Größenänderung der Anlage und die maßgebende Arbeitszahl dafür wurden am Beispiel von



Auch dem Anbieter Firma Uhrig sind durch den hohen Edelstahlpreis, die geringe Aufschlagendegression bei hohem, manuellem Fertigungsanteil und durch den sehr hohen Aufwand für Vertrieb, Projektierung und Risikoabsicherung offensichtlich enge Preisgrenzen gesetzt.

Der Autor vermutet, dass der Preis pro Laufmeter von 1.900 EUR nicht unterboten werden kann. In zahlreichen Fällen kommen aber hohe Kosten für zusätzliche Arbeiten, etwa für die Angleichung der Übergänge im Sohlgerinne und die Zu- und Ableitungen hinzu. Rechnet man damit, dass der Anlageninvestor z.B. zur Einbringung der Anlage auf eigene Kosten noch zwei Einstiegsschächte zusätzlich finanzieren muss, dann sind je nach Rohrkaliber und örtlichen Bedingungen nochmals extra etwa 15 bis 20.000 EUR dafür fällig.

Nutzbarer Abwasserstrom

Von überraschend großer Preisauswirkung ist der örtlich verfügbare, nutzbare Abwasserstrom im öffentlichen Sammler. Um eine realistischere Einschätzung der tatsächlich erforderlichen Einbaulängen für den Wärmetauscher zu ermitteln, wurden in Abhängigkeit zu den örtlich vorgefundenen Kanalrohrdimensionen und den nach generellem Entwässerungsplan der Stadt prognostizierten Trockenwetterabflüssen die notwendigen Flächen anhand der Teilfüllungskurven und den variablen Wärmeübertragungsleistungen berechnet. Aufgrund der günstigen Lage der Gebäude im Dreisamtal, entlang dem Hauptsammler des Abwasserzweckverbandes Breisgauer Bucht, ist der bei den untersuchten Anlagen verfügbare, mittlere Abfluss ($Q_{TW} = 87 \text{ l/s}$) in Freiburg sehr hoch.

Nicht berücksichtigt wurde die Tatsache, dass bei der Montage der Wärmetauscher regelmäßig mit einer Längenzugabe kalkuliert

werden muss. Technisch ist es in der Regel notwendig, nur ganze Kanalhaltungen auszustatten. Tendenziell führt das zu größer dimensionierten Anlagen, als unbedingt erforderlich.

Im Ergebnis wird festgestellt, dass zu geringe Trockenwetterabflüsse von sehr negativem Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage sind. Zwar ist damit zu rechnen, dass ein übermäßiger Wärmeentzug, bezogen auf die abfließende Abwassermenge, durch Fremdwasser und Wärmeausgleichsströme durch Boden- sowie Luftübertragungen teilweise ausgeglichen wird. Dennoch sind enge Grenzen gesetzt, wenn die Anlagenwirkungszahl nicht drastisch absinken soll, beziehungsweise wenn nicht die Gefahr der örtlichen Vereisung in Kauf genommen werden darf.

Die sinnvolle, untere Grenze ist nicht, wie meistens behauptet, $Q_{TW} = 15 \text{ l/s}$ sondern allein aus Wirtschaftlichkeitsgründen rund 40 l/s und mehr. Durch diese Einschränkung reduzieren sich der potenziellen Standorte für Wärmenutzungsanlagen drastisch. In Freiburg vermindert sich dadurch das räumliche Angebot um ca. $1/3$ gegenüber der ursprünglich angenommenen Kanallänge mit einem Mindestabfluss von $Q_{TW} > 15 \text{ l/s}$. Für viele kleinere Städte ist das sogar ein k.o.-Kriterium.

3 Betriebliche Faktoren

Leistungszahl und Jahresarbeitszahl

Die Leistungszahl ε , ausgedrückt als Heizwärmeleistung, bezogen auf die Antriebsleistung und die Hilfsenergie (Coefficient of Performance, COP) ist eine auf den Moment bezogene Leistungsangabe, die durch den Hersteller der Wärmepumpe i.d.R. für jeden Maschinentyp angegeben wird.

$$\text{Leistungszahl } \varepsilon = \frac{\dot{Q}_H}{P + P_H} > 3!$$

Bei den im Projekt beschriebenen Anlagen fehlt leider überwiegend die Jahresarbeitszahl β . Im Gegensatz zur Leistungszahl beschreibt sie den Gesamtwirkungsgrad der Anlage über einen längeren Zeitraum.

$$\text{Jahresarbeitszahl } \beta = \frac{Q_H}{W + W_H} > 3$$

Insbesondere werden darin auch die unterschiedlichen Bedingungen am Wärmetauscher des Kanals und der Wärmenutzung berücksichtigt:

1. Abwassermenge und Abwassertemperatur im Moment der größten Wärmeentzugslast.
2. Wärmeübertragungsleistung des Wärmetauschers im Kanal unter Berücksichtigung der Bauart, des Übertragungsmediums und des Verschmutzungsgrades.
3. Wärmeübertragungsleistung vom Kanal in die Heizzentrale.
4. Wirkungsgrad von Wärmetauscher und Wärmepumpe.
5. Erforderlicher, durchschnittlicher Temperaturhub zwischen Heizwassertemperatur (Vorlauftemperatur) und Kanalwärmequellentemperatur, ausgedrückt als Carnot-Leistungszahl der Anlage.

Durch das Einbeziehen der Energie für Nebenantriebe (Pumpen für Primär- und Sekundärkreislauf, Hilfsantriebe und Steuereinrichtungen für den sonstigen Anlagenbetrieb), kommt man zu objektiven Vergleichskriterien, auch in Hinblick auf verschiedene Wärmequellen.

Wärme aus Abwasser

Technik und Potenzial in Freiburg i.Br.



$$\text{Jahresheizzahl } \varphi = \frac{Q_H + Q_{ab}}{H_i \cdot V_B + W_H} \gg 4$$

- \dot{Q}_H Heizwärmeleistungsabgabe am Kondensator [kW]
- P Antriebsleistung [kW]
- P_H Hilfsenergie [kW]
- W Antriebsenergie p.a. [kWh/a]
- W_H Hilfsenergie p.a. [kWh/a]
- $Q_H + Q_{ab}$ Wärmemenge ab Kondensator u. Abgaswärmerückführung [kWh/a]
- H_i Heizwert Erdgas ca. 1,00 [kWh/m³]
- V_B Brennstoffmenge [m³/a]

her liegt als reines Grundwasser ($\approx 10^\circ\text{C}$), darf also eine garantierte Arbeitszahl von über 4,0 vorausgesetzt werden, sofern keine konstruktiven oder bautechnischen Mängel vorliegen. Bei den dokumentierten Anlagen scheint das auch tatsächlich erreicht zu werden, sofern nicht angestrebt wird, auch den Warmwasserbedarf mit hohen Temperaturen damit zu bedienen.

Bei den Modellberechnungen wurde standardmäßig vom Betrieb einer Elektrokompansionswärmepumpe ausgegangen. Das folgende Nomogramm einer handelsüblichen Wärmepumpe ist für die Abschätzung der Arbeitszahl geeignet. Der Zusammenhang von Heiz- und Kühlleistung bei einer bestimmten Stromaufnahme ist für den interessanten Arbeitsbereich der Anlage dargestellt. Für die Bemessung wirtschaftlich interessant ist der Vorlauftemperatur bei ca. 12°C und der Absenkungsbereich um ca. 4 K.

Es liegen keine eigenen Untersuchungen zu den optimierten Betriebsparametern einer möglichen Gasanlage vor.

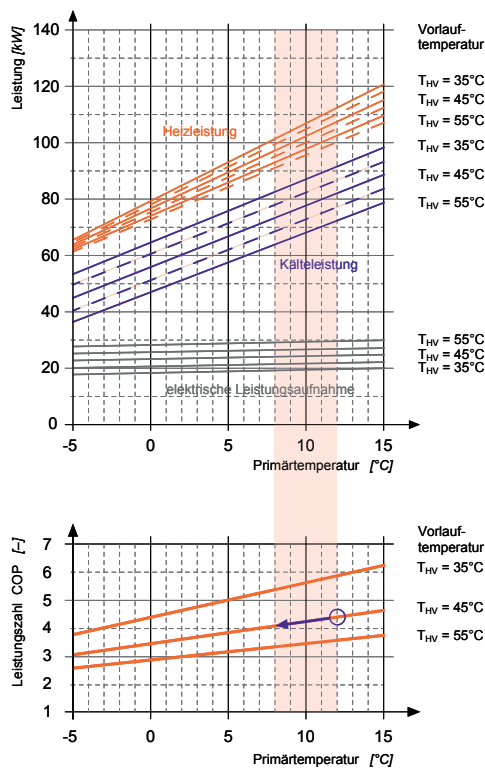


Abb. 39 Nomogramm zur Ermittlung realisierbarer Leistungszahl (Beispiel einer handelsüblichen Elektrowärmepumpe)

In der Literatur werden für Luft-Wasserwärmepumpen Arbeitszahlen von ca. 3,0 angegeben. Bei Erdwärme- bzw. Grundwassersonden von bis zu 4,0. Da davon ausgegangen werden darf, dass das Wärmeangebot durch erwärmtes Kanalwasser ($\geq 12^\circ\text{C}$) immer hö-

Reinigung Wärmetauscher

Auf die Bedeutung der Reinigung auf den Wirkungsgrad der Anlage wurde an früherer Stelle bereits eingegangen. Je höher die Wärmeübertragungsleistung, desto kleiner kann der Wärmetauscher ausfallen und umso geringer ist die Kapitalbindung beim Anlagenbau.

Trotz wissenschaftlich tiefreichender Betrachtungen zum Thema sind die praktischen Vorschläge z.B. des IKT nicht sonderlich hilfreich. Die Reinigungsintervalle, die für einen bleibend höheren Wirkungsgrad von mindestens 70 bis 80% notwendig wären, sind dermaßen kurz, dass die häufiger ausgesprochene Empfehlung, den Kanalabschnitt einfach öfters mit Hochdruckspülfahrzeugen zu besuchen, nicht sehr einleuchtend ist.

Auf die eingeschränkte Reinigungsleistung von automatischen Spüleinrichtungen wurde bereits hingewiesen. Erst durch den Einbau einer mechanisch wirkenden Anlage z.B. mit Bürsten oder einem Hochdruckinjektor direkt vor Ort, lassen sich dauerhafte Erfolge erzielen. Nach eigener Einschätzung rechnet sich eine solche Anlage tatsächlich dann, wenn für den Einzelfall eine preiswerte technische Lösung für den Einbau gefunden wird und wenn es nicht zu hohen Kosten für die Unterhaltung dieser technischen Einrichtung kommt.

Im Bereich des in Freiburg ortsüblichen Reinigungsintervalls von sowieso ein Mal pro Jahr ergibt sich insgesamt jedoch ein vernünftiges Verhältnis zwischen Investition und Betriebsvorteil, sodass auf große Experimente mit ggf. unabsehbaren oder zumindest unsicheren Folgen für den laufenden Abwasserbetrieb verzichtet werden kann.

Jahresnutzungsgrad der Anlage

Natürlich sollte die Jahresauslastung der Anlage möglichst hoch sein, damit der Preisvorteil durch geringeren Bedarf an fossilen Energieträgern zum Tragen kommt. Andererseits sind dem, selbst bei einer Kraft-Wärme-Kopplung, Grenzen gesetzt, weil die Spitzenlastvorhaltung zu viel Kapital bindet. Im interessanten Bereich über 60 bis 85% Jahresnutzungs-dauer verhält sich der Faktor aber nur moderat preisbestimmend.



Der Betrieb von Kälteanlagen wurde nicht berücksichtigt, ist aber bei der Bewertung der Gesamtwirtschaftlichkeit besonders interessant, wenn der Investor eine Vollklimatisierung wünscht.

Anlagenbetriebsweise

Es wurde versucht, die Wirkungsweise von verschiedenen Kombinationen an Wärmepumpentechnik einzuschätzen. Dabei wird der große Einfluss auf den Gesamtwärmegestehungspreis deutlich. Die meistens projektierten, konventionellen Wärmepumpenanlagen mit elektrischen Kompressionsanlagen sind trotz der geringeren Investitionen bei den interessanten, größeren Anlagen auf die Dauer relativ teuer. Wird die Anlage parallel zu einer bestehenden, voll ausgebauten Gas-Heizungsanlage aufgebaut (vollständig redundanter Betrieb) dann bleibt die Anlage stets außerhalb der Wirtschaftlichkeitsgrenzen. In diesem Sinne hatte das untersuchte Projekt Marienhaus in Freiburg trotz günstiger Randbedingungen keine Chance auf Wettbewerbstauglichkeit, da zunächst versucht wurde, alleine durch Vorteile der Energieeinsparung die Anlage parallel zur bereits projektierten Anlage zu rechnen. Interessant ist der Betrieb einer Gaswärmepumpe. Wenn diese darüber hinaus nur durch einen Gaskessel für die Abdeckung der Spitzenleistung ergänzt werden müsste (bivalenter Spitzenenergänzungsbetrieb), dann tragen die dafür eingesparten Investitionen für eine große Kesselanlage zu einem weiteren Preisvorteil im Wärmepumpenbetrieb bei.

Die interessanten Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Energielieferanten wie Holzkessel, BHKW und Fernwärme wurden am Projekt Güterbahnhalle Nord durch das beauftragte Ingenieurbüro näher untersucht. Danach

ist nicht von einer Konkurrenz, sondern von einer sinnvollen Ergänzung durch Wärmepumpentechnik auszugehen. Je höher der Lieferpreis für die Energie, desto wettbewerbstauglicher wird die Wärmepumpe.

4 Abschreibung und kalkulatorischer Zinsfuß

Bei der Ermittlung des mittleren Wärmegestehungspreises wurde eine durchschnittliche Abschreibungszeit über alle Anlagenteile von 15 Jahren angenommen. Diese Einschätzung ist ein realistischer Mittelwert aus den Vorstellungen von privaten Investoren, die i.d.R. keine längeren Abschreibungszeiträume als 10 bis 12 Jahre wünschen und Investoren wie badenova, die aufgrund ihrer regionalen, langfristigen Ausrichtung ggf. auch das Risiko einer längeren Bindung eingehen könnten.

Die gebrauchsgewöhnliche Nutzungsdauer der Wärmetauscheranlage und der Zu- und Ableitung ist bedeutend größer. Wie technisch bereits begründet, kann der Abschreibungszeitraum dafür ohne nennenswerte Risiken für den technischen Betrieb der Anlage bedenkenlos verdoppelt oder gar vervielfacht werden. Die Anlage ist technisch weniger beansprucht als eine normale Wasserversorgungsleitung. Die feste Ortslage, i.d.R. im öffentlichen Straßenraum und die feste Bindung an einen äußerst langlebigen Anlagenträger, nämlich ein Stahlbetonrohr oder ein Rohr noch höherer Wertigkeit von deutlich über 100 Jahren, lassen sichere Liegezeiten von 50 bis 100 Jahren erwarten. Dass ein Kanal stillgelegt werden muss, gilt als nahezu unmöglich und wird für die Hauptabwasserströme in Freiburg praktisch ausgeschlossen. Falls dieser Fall doch eintreten sollte, (z.B. Tunnelbau Freiburg Mitte) kann mit Entschädigungen oder Ausgleichsmaßnahmen in Höhe von derzeit 60 % gerechnet werden.

Der für die Untersuchung gewählte, durchschnittliche Abschreibungszeitraum der Wärmepumpenanlage ist mit 15 Jahren auf der sicheren Seite veranschlagt. Im Gegensatz zum Kanalwärmetauscher finden sich besonders bei Kompressionswärmepumpen bewegte Teile, die Steuerung und sonstige technische Ausrüstung ist komplex und unterliegt wesentlichen Abnutzungen. Zusätzlich ist mit Wertverlusten infolge der Innovation zu rechnen.

Die Variation des kalkulatorischen Zinsfußes hat im Gegensatz zur Abschreibungsdauer und natürlich in Abhängigkeit vom Anteil der Fremdfinanzierung für den aktuellen Rahmen der Kapitalzinsen eine mäßige Auswirkung auf den Preis. Durch den Zinseszins nimmt aber die finanzielle Bedeutung jedes Teils der Investition bei zusätzlichem Finanzbedarf überproportional zu.



Die allgemeinen technischen und in der Folge auch wirtschaftlichen Bedingungen verlagern sich abhängig vom gewählten Standort einer Wärmenutzungsanlage vom Anfang (Begin of Pipe) bis zum Ende des Kanalnetzes (End of Pipe). Vor und nach der Kläranlage herrschen regelmäßig die besten Verhältnisse für den Betrieb einer Anlage.

Gewichtung der Randbedingungen

1. Wärmeangebot

- Abwassertemperatur
- Abwasser-/Wärmemenge
- Stetigkeit Abwasserwärme-/Kälteangebot
- Versorgungssicherheit

2. Anlagenbetrieb

- Anlagenbetriebssicherheit für Wärmeanlagenbetreiber
- Kanalnetzbetriebssicherheit für Kanalnetzbetreiber
- Aufwand für redundante Wärmebereitstellung
- Wärmetranslation (Wärmübergang Wärmetauscher)
- Wärmetransformation (→ Temperatur Sekundärseite)
- Wärmeverluste Abwasserkanalnetz
- Wärmeverluste Vorlauf Wärmetauscher

3. Wärmeabnahme

- Zyklizität Wärme-/Kälteangebot und -abnahme
- Zusatzinvestitionen bauseitige Anpassung (Niedertemperatur)

4. Investition und Betriebskosten

- Absolute Investitionskosten
- Relative Investitionskosten pro kWh
- Rentabilitätssicherheit für Abnehmer
- Rentabilitätsrisiko für Anlagenbetreiber
- Konkurrenz mit anderen Wärmeerzeugern
- Synergien mit begleitenden Investitionen
- Kapitalbindung
- Aufwandminimierung Sicherung Unterhalt und Betrieb
- Aufwandminimierung Sicherung sekundäre Betriebsenergie



F SONSTIGE INVESTITIONS- UND BETRIEBSBEDINGUNGEN

Die vom VSA jüngst geforderte Aufnahme von systematischen Kanalwärmeerschließungskonzepten, z.B. im Rahmen des Generellen Entwässerungsplanes, ist zweckmäßig. Der besondere Wert und die Dringlichkeit sind jedoch eingeschränkt. In allen Gemeinden, in denen eine hydrodynamische Kanalnetzberechnung vorliegt (technischer Standard), ist auch die theoretische Grundlage zur Abschätzung des Trockenwetterabflusses bereits gegeben. Über das Kanalinformationssystem sollten diesen Daten sofort und ohne zusätzlichen Aufwand abrufbar sein. Wie sich bei der vorliegenden Studie nochmals klar zeigte, sind alle darüber hinausgehenden, aber in der Regel entscheidenden Wirtschaftsfaktoren vorab nicht in der wünschenswerten Weise präzisierbar.

Die Frage eines Nutzungskonzeptes ist also unmittelbar an das Vorhandensein eines zeitgemäßen allgemeinen Kanalplans geknüpft. Die Entscheidung zu diesem Instrument wird, soweit nicht schon längst betrieblich entschieden, bestimmt nicht durch einen einzelnen Wärmenutzungsinteressierten ausgelöst. Für diesen Fall genügt zunächst die einfache Abschätzung. Anschließend sind zur Sicherung der Wirtschaftlichkeit der Investition eingehendere Messungen der Temperaturen und der Abwassermenge vor Ort sinnvoll. Die Daten des hydraulischen Gesamtmodells liegen erfahrungsgemäß tendenziell eher zu hoch und berücksichtigen den Fremdwasseranteil nicht ausreichend genau. Davon abgesehen ist nichts über die kritischen Minimalabflüsse in den Nachtstunden bekannt. Deshalb ist Vorsicht geboten.

badenova verfügt über ungewöhnlich günstige Voraussetzung zur Realisation gemeinsamer Projekte im Bereich zwischen Abwasserab- und Wärmeerzeugung. Die

Experten beider Sparten befinden sich bislang unter einem Dach und unterstützen sich gegenseitig bei Projekten mit Anlagen der Infrastrukturleistungen wie z.B. der Bebauung des Alten Messegeländes oder des Güterbahnhofs Freiburg Nord.

1 Vertragswesen

Die Leistungs- und Liefergrenzen werden vor einem Vertragsabschluss eindeutig formuliert. Sieht man von den Besonderheiten ab, dass bei der Kanalwärmenutzung noch weitere Partner berücksichtigt werden müssen, dann gibt es darüber hinaus keine Besonderheiten. Während bei einer bodenthermischen Anlage das Umweltschutzamt über die Zulässigkeit der Wärmenutzung bzw. der Grundwasserbenutzung entscheidet, ist es im Fall der Kanalbenutzung in Freiburg ebenfalls die Stadt, vertreten durch den Eigenbetrieb Stadtentwässerung und der Anlagenbetreiber Abwasser Freiburg GmbH. Als dessen „100% Dienstleister“ von genereller Planung bis Kanalisationsbetrieb, tritt wiederum die badenova AG & Co. KG auf.

Bei den Hauptsammlern der Stadt tritt der Abwasserzweckverband Breisgauer Bucht als Vertragspartner auf. Nach Definition der Verbandssatzung ist dieser Eigentümer des Kanals, sobald „Verbandsabwasser“ darin fließt. Praktisch ist hiervon vor allem der Dreisammparallelkanal betroffen. Er durchkreuzt die Stadt von Ost nach West entlang einer auch infrastrukturell und siedlungsmäßig wichtigen Achse von Freiburg.

Durch die Ausgliederung der Sparte Wärmeanlagen und durch die betriebswirtschaftliche Trennung von Energiehandel und Netze sind auch die restlichen tangierten Vertragsbereiche nicht sehr viel übersichtlicher. Auch die Frage der regelmäßigen Reinigung und Nachschau des Kanalwärmetauschers kann sinnvoll im eigenen Haus durch die Abteilung Kanalisationsbetrieb erledigt werden.

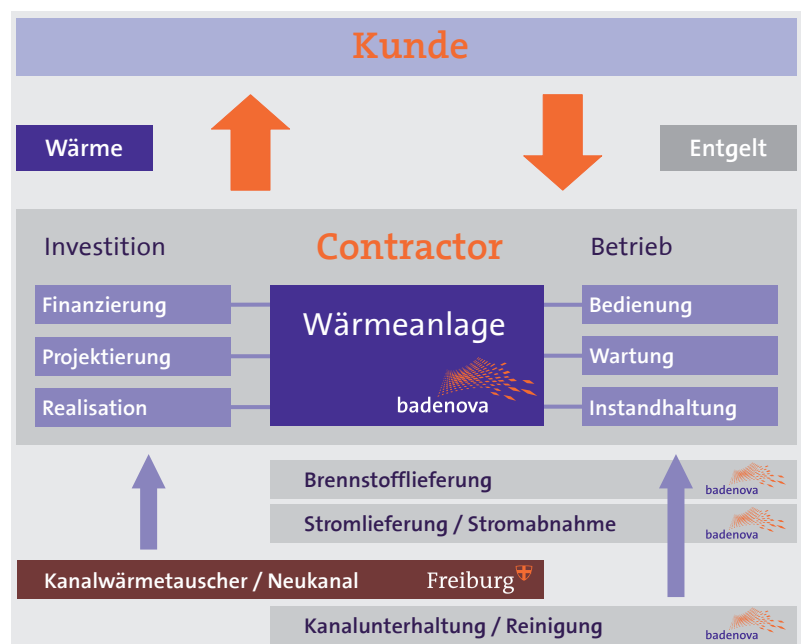


Abb. 40 Schema für das Wärmecontracting



Über Lieferverträge und Leistungsvereinbarungen sind die notwendigen Details zu regeln. Letztlich bleiben aber viele Bereiche direkt unter dem Dach des Mutterkonzerns badenova AG & Co. KG und bei der Stadt Freiburg.

Eine denkbare Definition sinnvoller Liefergrenzen ist im Folgenden dargestellt. Diese Grenzen können auch konkret auf technischer Ebene formuliert werden (siehe Beispiel Abb. 24).

Anspruchsvoll wird die Aufgabenstellung dann, wenn auch noch eine differenzierte Leistungsvergütung für Strom und Kälte berücksichtigt werden muss.

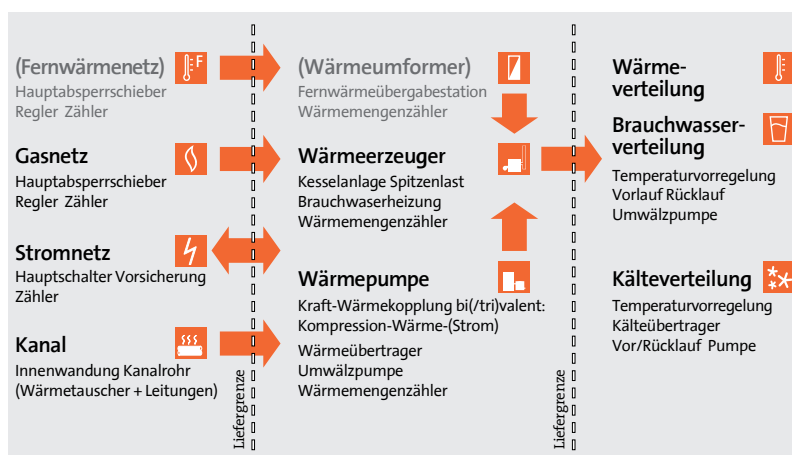


Abb. 41 Liefergrenzen beim Wärmecontracting

2 Eigentumsfragen und rechtliche Kontrolle

Sowohl nach deutschem als auch schweizerischem Gesetz ist der Abwasserentsorgungspflichtige zugleich Eigentümer des Wassers und zwar ab der Stelle, an der der Wassererzeuger das Wasser von seinen Grundstücksentwässerungsanlagen ableitet (→ Abfallgesetz). Nach übereinstimmender Auffassung aller Gutachter erwirbt der Entsorgungspflichtige damit auch alle Rechte an der Nutzung des Abwassers.

In Deutschland ist die Gemeinde für die Siedlungsentwässerung zuständig (Wasserhaushaltsgesetz).

So wie (privaten) Dritten die Aufgabe der Abwasserentsorgung übertragen werden kann, können von der Gemeinde auch Konzessionen verteilt werden, über die die Nutzung der Wärme differenziert geregelt wird.

In der Schweiz werden Konzessionen zur Wärmeentnahme /-zuleitung durch die kantonalen Gewässerschutzfachstellen erteilt. In Deutschland bietet es sich an, die Entnahme von Energie aus dem Kanalnetz analog zu der praktizierten Kühlwasser- oder Wärmenutzung aus Grundwasser zu regeln. Durch die enge Beziehung dieser Benutzungsformen zum Boden- und Grundwasser und vor allem zu den anschließenden öffentlichen Gewässern ist es naheliegend, dass die Bewilligung und Kontrolle analog zur Tätigkeit der unteren Wasserschutzbehörde durch die Stadtentwässerung vorgenommen wird.

Das Satzungsrecht der kommunalen Siedlungsentwässerungsfachstellen ist zur Regelung der Nutzung geeignet. Der Einzelfall muss durch die Verwaltungsvertreter geprüft werden. Dabei stehen die Gefahr einer Einschränkung der öffentlichen Entsorgungssicherheit (Störungen im Kanalisationsbetrieb sowie hydraulische und Dichtheitsbelange des Kanals) und die Ausgleichsregelung für finanzielle Nachteile des Kanalnetzbetreibers im Vordergrund.

Das Satzungsrecht der kommunalen Siedlungsentwässerungsfachstellen ist zur Regelung der Nutzung geeignet.

Der Einzelfall muss durch die Verwaltungsvertreter geprüft werden. Dabei stehen die Gefahr einer Einschränkung der öffentlichen Entsorgungssicherheit (Störungen im Kanalisationsbetrieb sowie hydraulische und Dichtheitsbelange des Kanals) und die Ausgleichsregelung für finanzielle Nachteile des Kanalnetzbetreibers im Vordergrund.

3 Konkurrierende Wärmeanlagen

Die Kosten einer Anlage zur Kanalwärmenutzung im parallelen Betrieb zu einer bestehenden, konventionellen Kesselanlage direkt mit den Kosten dieser Anlage alleine zu vergleichen, ist unter kurzfristigem Betrachtungshorizont nicht sinnvoll. Die Wirtschaftlichkeit ist in diesem Fall, wie gezeigt, erst bei sehr langfristigen Lieferverträgen überhaupt zu erwarten.

Eine Kanalwärmerecyclinganlage steht dann in Betracht, wenn eine Anlage ganz neu zu konzipieren ist. Sie steht dann vor allem im Wettbewerb mit anderen Techniken der Wärmepumpe z.B. zur Erdwärmenutzung oder mit Blockheizkraftwerken.

Streng genommen müsste man zumindest bei jeder mit Erdwärmetechnik installierten Investition nachprüfen, ob nicht ein nutzbarer Kanal in der Nähe vorhanden ist, der aufgrund seines höheren Wärmeangebots

Wärme aus Abwasser

Technik und Potenzial in Freiburg i.Br.



im Regelfall die preisgünstigere Variante der Energiequelle ist.

Die Situation in Freiburg ist aufgrund der Konzentration vieler Infrastrukturleistungen auf die badenova AG & Co. KG relativ übersichtlich und zusammen mit der Stadtverwaltung, Energiefachstelle Umweltschutzamt und dem Stadtplanungsamt in der Lage, das Baugeschehen in Freiburg zu überwachen und die potenziellen Investoren zumindest in eine Richtung zu beraten.

Die Anzahl größerer Wärme-(Kälte-)Anlagen in Freiburg ist begrenzt. Anders als zu Beginn der vorliegenden Studie angenommen, konkurrenziert die Kanalwärmernutzung nicht die anderen

Wärmetechniken der badenova und anderer Dienstleister. Sie steht im Wettbewerb mit dieser, ergänzt aber auch in gewisser Hinsicht die Technik im Heizungs- und Kühlbereich.

Natürlich ist es wichtig, dass bereits vorhandene Nahwärmenetze noch besser ausgelastet werden. Von kurzfristigen ökonomischen Vorteilen der badenova und der Universitätsklinik abgesehen, sollte aber immer wieder überprüft werden, ob die ggf. vorhandenen Überkapazitäten dieser Zentralanlagen nicht durch Anwerbung vor allem kleinerer Kunden im unmittelbaren Anschlussbereich entlang der vorhandenen Heizwärmetrassen sinnvoller ausgeglichen werden, als dass durch Verzicht auf eine Kanalwärmerecyclinganlage mit höherem Einsparungspotenzial an fossilen Rohstoffen die Gesamtenergiebilanz von Freiburg verschlechtert wird.

Gemäß Grafik sind theoretisch noch einige Standorte vorhanden, an denen die Kanalwärme als Alternative abgewogen werden kann. Wie sich in den zurückliegenden drei Jahren zeigte, kommen noch mehr Objekte in Frage, als hier in vorliegender Studie berücksichtigt sind.

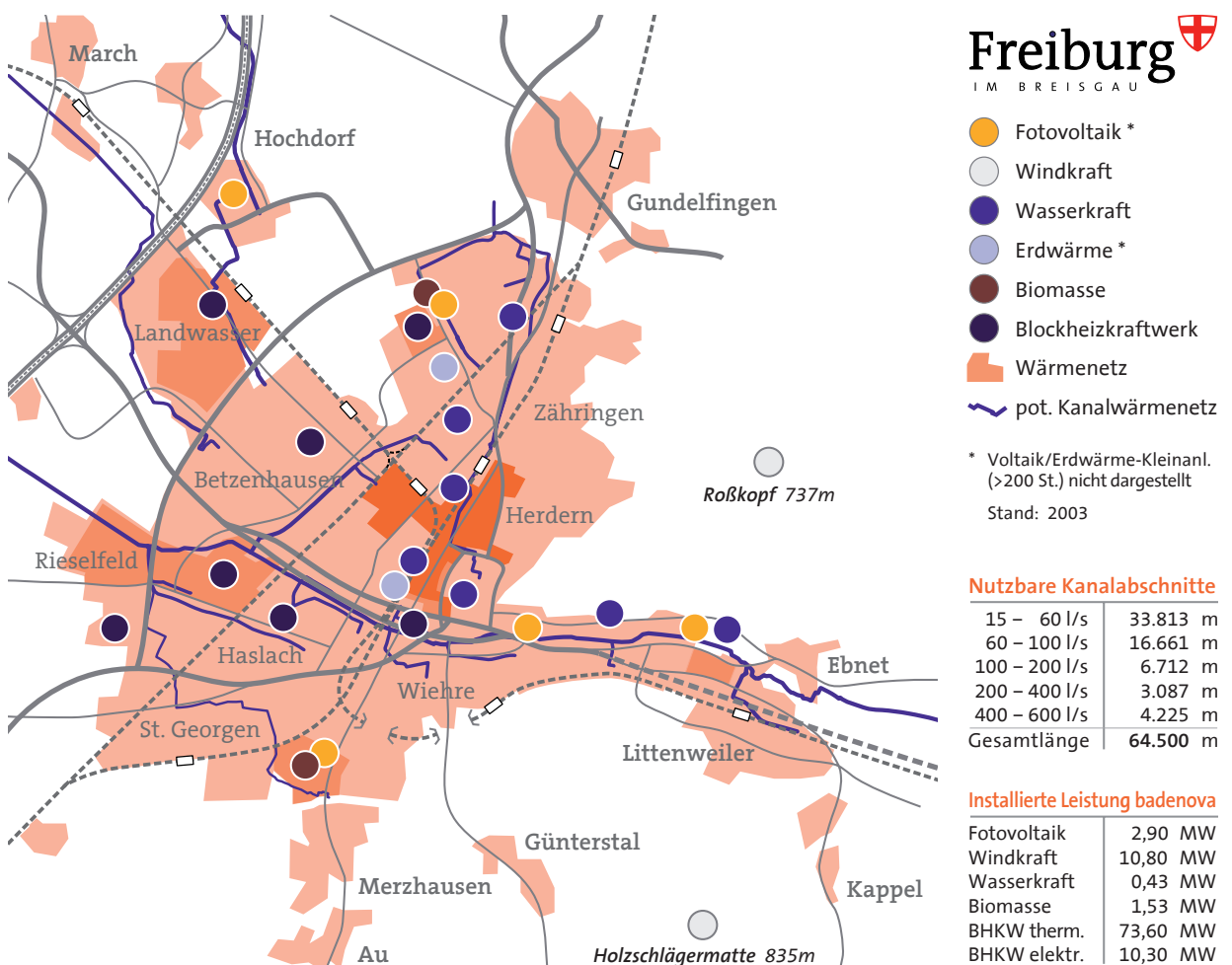


Abb. 42 Zentrale Wärmeanlagen und sonstige nachhaltige Energieversorgungen in Freiburg (ggf. zu ergänzen)

Wärme aus Abwasser

Technik und Potenzial in Freiburg i.Br.

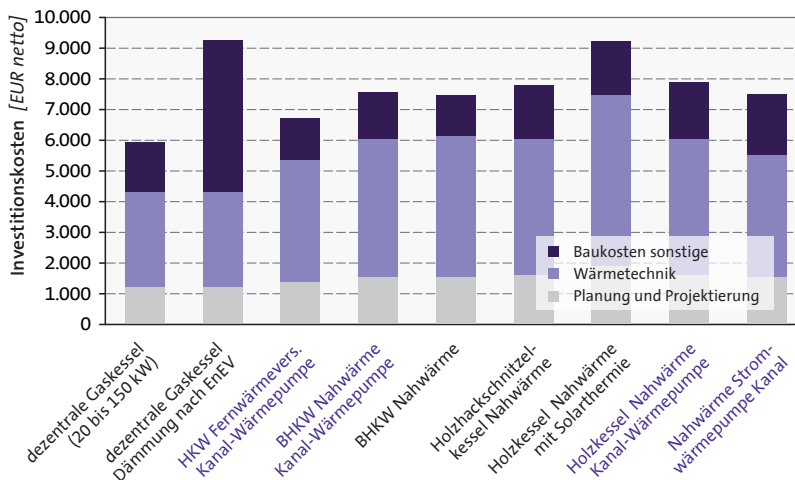


Abb. 43 Vergleich erforderliche Investitionen verschiedener Heiztechnik (Beispiel Projekt Güterbahnanreal Nord in Freiburg)

Entscheidendes Potenzial liegt nach wie vor in der Nahwärmeerschließung ganzer Baugebiete. Selbst unter Berücksichtigung des harten Wettbewerbs bereits installierter Wärmeleistungen aus den bestehenden Fernwärmenetzen hat die Kanalwärme bei steigenden Gaspreisen mittelfristig Chancen, wirtschaftlich mitzuhalten.

In Basel hat man die Kanalwärmenutzung nach einer Untersuchung aus dem Jahr 2003 bis auf Weiteres zurückgestellt, weil in den interessanten Stadtarealen eine unerwünschte, direkte Konkurrenz mit der zentralen Wärmeversorgung erwartet wird.

Das Beispiel des untersuchten Baugebietes Güterbahnanreal Nord in Freiburg Brühl macht deutlich, dass dieses Kombimodell unter Ökologie- und Kostengesichtspunkten im Vergleich mit anderen Techniken dagegen verhältnismäßig positiv abschneidet.

Das günstige Verhältnis ist nicht zuletzt auf den möglichen Verzicht von redundanten Heizkapazitäten zurückzuführen. Die Verbindung mit der zentralen Energieerzeugung mittels Gasturbine erweist sich darüber hinaus als besonders effizient.

Aber auch in Kombination mit anderen Heiztechniken werden keine überdurchschnittlichen Investi-

tionskosten bei der Kanalwärmenutzung erwartet.

Bei Baugebieten mit unterschiedlichen, vor allem privaten Investoren, sind die Möglichkeiten zur direkten Einflussnahme auf die gewählte Form der Energieversorgungstechnik eingeschränkt. Das hat sich bei den Verhandlungen mit der Vertretergesellschaft der Deutschen Bahn über das Baugebiet Güterbahnanreal Nord deutlich gezeigt.

Die enorm hohe Kapitalbindung für den Kanalwärmetauscher führt in den ersten Jahren zu einem schwerwiegenden Überhang der Aufwendungen für den Kapital-

dienst. Durch die Zweiteilung der Wärmepumpeninstallation kann der Effekt zwar tendenziell gemindert werden. Im Vergleich zu anderen Heiztechniken bleibt der Effekt dennoch überdurchschnittlich.

In den Modellberechnungen wurde die Installation einer strombetriebenen Wärmepumpe vorgesehen. Wie sich herausstellte, wäre die Einrichtung mit gasbetriebenen Anlagen günstiger. Mittel bis langfristig erzeugt man demnach aus der Kombination von BHKW zusammen mit Kanalwärme die preislich günstigste Wärme. Kurzfristig schneidet die Variante Wärmepumpe und Fernwärmenetzanschluss vorteilhaft ab.

Berücksichtigt man zudem die ggf. wünschenswerte Kälte, dann wird der Vorzug einer Kanalwärmezentrale noch größer.

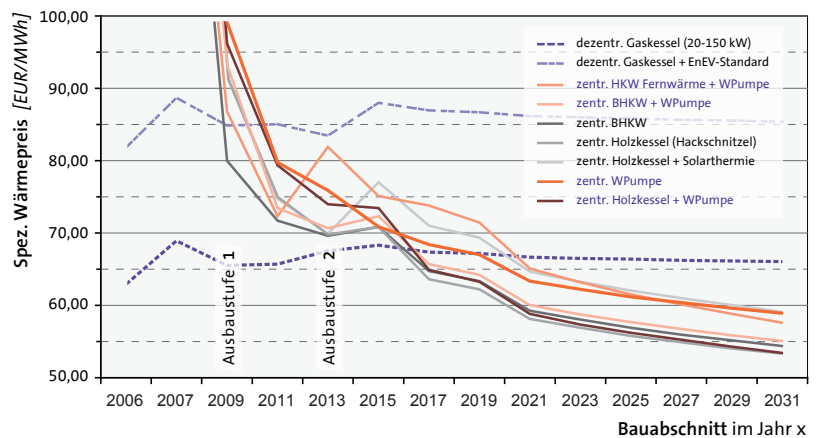


Abb. 44 Abhängigkeit Spez. Wärmegestehungspreis von Ausbaugrad Zentrale Wärmeanlage und Wärmeabnahmemenge. Vergleich mit alternativen Heiztechniken. (Beispiel Projekt Güterbahnanreal Nord in Freiburg)

Bei weiteren Punkten ist die Kanalwärmenutzung gegenüber anderen Techniken ebenfalls im Vorteil:

- Die Sicherheit der Energielieferung aus dem Kanal ist besonders hoch und langfristig und entlastet den Betreiber von der Abhängigkeit eines einzigen Energielieferanten.



- Der ökologische Vorteil lässt sich unter Umständen bei den Wohnungskäufern besonders gut vermarkten.
- Bei Auflagen zur Energieversorgung durch das Umweltschutzamt kann die Stadt eine Alternative bei der umweltverträglicheren Gebäudeheiztechnik aufzeigen.
- Zumindest zum gegenwärtigen Zeitpunkt darf davon ausgegangen werden, dass die Kanalwärmenutzungsanlage staatlich gefördert wird. Zumindest werden zinsgünstige KfW-Mittel zur Verfügung gestellt.
- Die Kanalwärme ist im Vergleich zur Erdwärmenutzung mit Sicherheit ohne umweltgefährdende Eingriffe in den Grundwasserhaushalt möglich.

4 Rentabilität und Gewinnbeteiligung

Die Mindestrentabilität aus dem Reinerlös des Wärmeverkaufs ist, bezogen auf das gebundene Kapital derzeit noch schwer absehbar. Im vorliegenden Kostenmodell sind Gewinn und Risikokosten nicht separat ausgewiesen. Sie können aber über den gewählten Kapitalzins leicht simuliert werden, wenn der Investor der Anlage seine Gewinnerwartungen auf das eingesetzte Kapital über einen zusätzlichen Zinsaufschlag einrechnet.

Durch die hohe Kapitalbindung berechnet sich für eine marktübliche Mindestrentabilität von über 7% der notwendige Zuschlag auf die mittleren, spezifischen Wärmekosten von 5,5% zu insgesamt ca. 65 bis 66 EUR/MWh.

Sofern es dem Kontraktor gelingt, den Kunden über die Gestaltung der Verträge langfristig an die eigene Lieferung mit Gas und Strom zu binden, kann ein kleinerer Teil

des Gewinns indirekt über den Verkauf der Energieträger Gas und Strom abgeschöpft werden. Dieser Anteil nimmt durch den abnehmenden Kapitalkostenanteil am Gesamtgestehungspreis überproportional zu. Bei der ermittelten mittleren Anlagengröße von unter 1.000 MWh/a Nutzwärme aus Kanalwärmeregeneration bleibt der Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten (= Kapital- + Betriebs- + Energiekosten) jedoch unter 15%. Der Spielraum für den positiven Deckungsbeitrag ist entsprechend gering.

Berechnete mittlere Spezifische Wärmekosten:

$$\text{Mindestrentabilität} \geq 7\% = \frac{\text{Erlöse} - \text{Kosten}}{\text{durschn. gebundenes Kapital}}$$

$$\text{periodischer Erlös} \geq 7\% \cdot 30.600 + 39.100 \geq 41.250 \quad [\text{EUR/a}]$$

$$\text{Vollkostenpreis} \geq 65,90 \quad [\text{EUR/MWh}]$$

Der Anlagenbetreiber könnte auch über die Vergütung von laufenden Betriebskosten einen Deckungsbeitrag erwirtschaften. In der Praxis wird jedoch gerade bei der Beschäftigung von Betriebspersonal ein besonders hoher Konkurrenzdruck ausgeübt. Die Risiken der Betriebskosten für die maschinentechnische Ausrüstung können durch langfristige Verträge zwar überwiegend externalisiert werden. Bei einem errechneten Anteil der Betriebskosten von insgesamt konstant ca. 6% kann aber auch hier kein nennenswerter Deckungsbeitrag erzielt werden.

Bei den Betriebskosten kommt ein weiterer Unsicherheitsfaktor hinzu: Für Nachteile, die der Kanalnetzbetreiber durch den Einbau der Wärmetauscher hinnimmt, steht diesem dafür zumindest ein geldwerter Ausgleich zu. In den meisten Fällen aber kann der Kostenpunkt hierfür ohne langjährige Erfahrungen nicht benannt werden. Bei einer Anlage in Basel wurde hierfür gar kein finanzieller Ausgleich gerechnet. Die Nachteile sind nicht wesentlich und die Anlage läuft ihrem Wesen nach im Sinne des Allgemeinwohls.

Das Gesamtnutzungspotenzial der Kanalwärme kann mit den untersuchten, denkbaren Anlagen nach erzeugten Gesamt-megawattstunden pro Jahr aufsummiert werden. Sortiert man die Anlagen nach deren prognostizierten, spezifischen Wärmegestehungspreisen, dann ergibt sich eine Verteilung mit relativ deutlich zweigeteilten Ästen der Korrelation von Leistung und Preis.

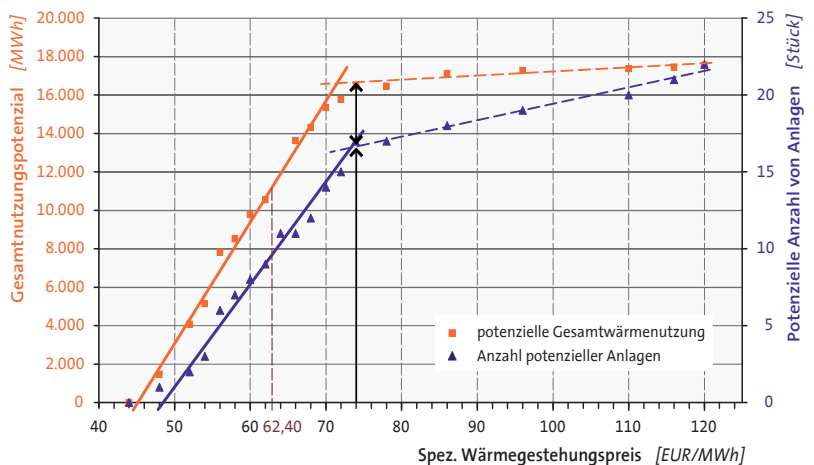


Abb. 45 Potenzielle Anzahl von Kanalwärmenutzungsanlagen in Freiburg, abhängig vom Spezifische Wärmegestehungspreis



Die gleichen Anlagen aufaddiert, ergibt sich eine Gesamtanzahl von insgesamt 17 Stück, die im Bereich eines annehmbaren Preisniveaus arbeiten könnten.

Nicht berücksichtigt sind die potenziellen Baugebiete. Diese können über die angestellten Modellberechnungen nicht ohne Weiteres zahlenmäßig nach gleichem Muster wie die Einzelanlagen dargestellt werden. Sie liegen aber stets im Großanlagenbereich, sodass in vielen Fällen trotz der Wärmeverteilungskosten Preise im mittleren bis unteren Segment erwartet werden dürfen.

Die Gemeinde hat bei der Abwasserentsorgung ein Monopol. Der Abwasserentsorgungspflichtige muss seine Abwasseranlage an die öffentliche Entsorgung anschließen oder sein Abwasser zur Reinigungsanlage bringen, wenn die Gemeinde ihn davon nicht ausdrücklich befreit (Anschluss und Benutzungszwang).

Um zu gewährleisten, dass die Gemeinde über diesen Weg nicht ungerechtfertigt zusätzliche Einnahmen über Abwassergebühren erwirtschaftet, gibt es mit dem Kommunalen Abgabengesetz unmissverständliche Regelungen über den Nachweis von Höhe und Verwendung der Gebühren und über die enge Zweckbindung dieser Einnahmen. In Freiburg wird diese Zweckbindung bis in Details verfolgt, in anderen Kommunen wird der Ermessensspielraum darüber jedoch oftmals flexibler gehandhabt.

Die Kanalwärmenutzung ist an das Dargebot von Abwasser unmittelbar geknüpft. Analog zu den Regelungen zum Abwasser können entsprechend die Nutzungsbedingungen für die Kanalwärme abgeleitet werden.

Beim Erfahrungsaustausch der Großstädte im deutschsprachigen Raum wurde 2003 die Frage gestellt, ob der öffentliche Kanal-

netzbetreiber die Nutzung der Wärme aus Abwasser seiner öffentlichen Kanalisation davon abhängig machen kann, dass zwischen ihm und dem Wärmenutzer ein Nutzungsvertrag zustande kommt, in dem auch ein angemessenes Entgelt verabredet wird.

Mit Blick auf eine denkbare Beteiligung am Gewinn wurden fernerhin die Kollegen anderer Städte gefragt, welche Entgelthöhe sie über die Entschädigung von finanziellen Nachteilen des Kanalisationsbetriebes hinaus für gerechtfertigt halten.

Die Antworten fielen erwartungsgemäß aus. Die meisten städtischen Kanalnetzbetreiber (21 von 25 antwortenden Städten) hatten sich zu diesem Zeitpunkt mit der Frage noch gar nicht konfrontiert. Einigkeit besteht jedoch darüber, dass Nutzungs- und Bewirtschaftungsnachteile durch den Wärmeanlagenbetreiber in jedem Fall auszugleichen sind.

Da bis auf Weiteres nicht mit einem Gewinn kalkuliert werden kann, stellt sich in der Praxis die Frage nach der Beteiligung der Stadtentwässerung noch nicht.

Die Erwartungen daran sollten auch längerfristig gering bleiben. Die Auffassung der Stadtentwässerung Freiburg, dass diese am Gewinn zu gerechten Teilen (z.B. 50:50) zu beteiligen ist, wird zu Recht kontrovers diskutiert. Der Entwässerungsbetrieb ist nach dem Gemeinwohlprinzip grundsätzlich nicht berechtigt, echte Gewinne zu erwirtschaften. Solange der Eigenbetrieb gesetzlich allein auf die Abwasserentsorgung verpflichtet ist, beschränkt sich sein Anspruch also zunächst nur auf den Ausgleich von möglichen, wirtschaftlichen Nachteilen. Anders ausgedrückt: Es wird dringend empfohlen, dass sich der Abwasserbetreiber in der Wirtschaftsfrage neutral verhält.

Würden die Gewinne des Investors bzw. des Kanalwärmennutzers nennenswert, dann muss natürlich für einen Ausgleich zugunsten der Gemeinde gesorgt werden. Der Bezug zum Abwasserbetrieb besteht aber höchstens über die Abwasseranschlüsse der einzelnen Anschlussnehmer. Die Gemeinde kann, muss aber nicht die Entgeltfrage über die Abwassergebühr regeln. Genauso gut ist auch eine allgemeine Konzessionsabgabe wie für Wind oder Bodenschätze denkbar.

5 Förderungen

Bei der Ermittlung der durchschnittlichen spez. Wärmegestehungskosten wurden in der Wirtschaftlichkeitsrechnung keine Subventionen berücksichtigt. Bei allen Anlagen, die in der Bundesrepublik Deutschland bislang gebaut wurden, gab es offensichtlich jedes Mal Unterstützungsbeträge durch den Staat. Sinn der Förderung ist die Erforschung und ggf. die Etablierung einer neuen Technik mit dem Ziel, den Anteil der nachhaltigen und ggf. regenerativen Anteile an der Gesamtenergieversorgung zu maximieren. Damit sind die Förderbedingungen klar auf einzelne Vorhaben fixiert. Von einer regelrechten Subvention kann nicht eigentlich die Rede sein.



Förderbedarf und -höhe

Mittelfristig darf trotz der vielen genannten technischen und wirtschaftlichen Einschränkungen aufgrund der rapide abschmelzenden Reserven an fossilen Energieträgern fest mit einem anwachsenden Interesse an der Technik gerechnet werden.

Sofern aber nicht der Preis alleine über die Wirtschaftlichkeit der Wärme- und Kälteerzeugung in den kommenden Jahren über die Realisation von Wärmerecyclinganlagen entscheiden soll, muss der Markt durch gezielte Maßnahmen unter Nutzung der Richtlinienkompetenz der öffentlichen Hand beeinflusst werden.

Durch das Energiegesetz der Schweiz wurden in diesem Sinne wichtige Voraussetzungen geschaffen, um die Nachhaltigkeitsfragen nicht alleine durch marktselfregulative Faktoren zu sichern.

Die Stadt Schlieren schafft die Basis eines Wärmeverbundes, indem die Bauherren sogar zum Anschluss an den Abwasserenergieverbund verpflichtet werden. Ähnliche Vorgehensweisen wurden auch in Freiburg bei der Frage von zentralen Wärmeverbundnetzen gewählt, um die wirtschaftliche Grundlage für die notwendigen Investitionen zu schaffen. Die Frage ist aber, ob die öffentliche Hand gezielt und unter Inkaufnahme von ökonomischen Nachteilen privater Investoren die Art der Energienutzung vorschreiben darf oder sollte.

Grundsätzlich ist auch die Subventionierung von Wärmerecyclinganlagen nach dem Muster der Solarstromförderung denkbar. Auf der Herstellerseite hilft die Bereitstellung von günstigen Krediten. Auf Abnehmerseite könnte der Abnahmepreis garantiert werden.

Die **Förderwürdigkeit** ist an sinnvolle Bedingungen für die Förderungen zu knüpfen. Im Fall der Kanalwärmenutzung scheint es offensichtlich, dass der Anteil der

Wärmerückgewinnung an der Gesamtenergiebereitstellung als Bemessungsmaßstab herangezogen wird. Gleichfalls geeignet ist der Schlüssel an CO₂-Äquivalenten nach Regelungen des gesamten CO₂-Handels wie in anderen Branchen eingeführt.

Die **Förderhöhe** orientiert sich am nachzuweisenden finanziellen Nachteil gegenüber konventionellen Wärmeversorgungsanlagen. Nachzuweisen wäre der wirtschaftliche Nachteil der Anlage in Form der prognostizierten und später ggf. nachkalkulierten, höheren absoluten Jahresgesamterzeugungskosten, bezogen auf die projektierte Abschreibungszeit. Letzteres fördert die Bereitschaft, sich längerfristig mit Orientierung an der tatsächlichen Nutzungsdauer der Anlage an diese zu binden.

Der Förderbedarf und die Förderhöhe wurden nach der Entwicklung der Energiepreise für Gas und Strom für Freiburg abgeschätzt. Bei einer linearen Preissteigerung ist danach die Wettbewerbsfähigkeit der gewählten Standardanlagentypen vollständig erreicht, wenn der Preis für die Energie auf das Niveau von 140 bis 170 % des heutigen Preises gestiegen ist. Der Break-even-Point ist erreicht, wenn die Steigerung der laufenden Brennstofflieferpreise die Vorteile der geringeren Kapitalkosten einer konventionellen Gaskesselanlage im Vergleich zu einer modernen Wärmepumpenanlage aufzehren. Dieser Punkt wird durch folgende drei Faktoren bestimmt:

1. Die absolute Höhe der Investitionsausgaben und die Finanzierungsbedingungen für die Kapitalbereitstellung.
2. Der Anteil der Betriebs- und Verbrauchskosten, der sich aus der gewählten Technik und Betriebsweise ableitet.
3. Die absolute Höhe des Energiepreises, abhängig vor allem vom Rohstoffpreis und der Besteuerung.

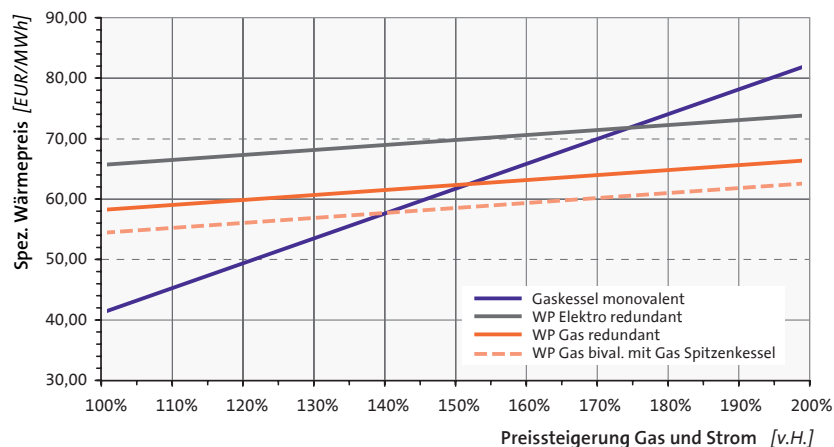


Abb. 46 Entwicklung Defizite Spez. Wärmegestehungspreis, abhängig von Energiepreisentwicklung (Abschätzung für pot. Kanalwärmenutzungsanl. Freiburg)

Die Bindung der Fördermittel ist dem Förderzweck entsprechend in verschiedenen Varianten denkbar. Da eine laufende Subvention aufgrund der derzeitigen gesetzlichen Situation nur im Strombereich besteht, müssen zur Bestimmung des zu kompensierenden Defizits für den Anlagenbetreiber die Jahresbruttomehrkosten auf den Zeitpunkt der Mittelzuwendung kapitalisiert werden, um diese als „nicht amortisierbare Mehrkosten“ ausschütten zu können. Weil die Energiepreisentwicklung



nicht zuverlässig prognostiziert werden kann, bietet es sich an, die Förderung in Tranchen aufgrund eines einheitlichen Energiepreises zu vereinbaren, oder die Verluste als Sonderabschreibung bei der Steuer gelten zu lassen.

Andere Formen der Förderung (z.B. Bezuschussung des innovativen Bauanteils) sind denkbar und leichter kalkulierbar, aber nur bedingt und zeitlich klar limitiert zielführend.

Eine Einbindung in den CO₂-Handel ist denkbar.

Die Stadt als Wärmeanbieter

Der Gemeinde sind bedauerlicher Weise sehr enge finanzielle Grenzen für die Eigeninitiative bei der Umstellung der Energieversorgung besonders der eigenen Räume für Verwaltung und anderer öffentliche Einrichtungen wie Schulen, Sporthallen und Schwimmbäder gesetzt. Sie kann also mangels Geld und rechtlicher Handhabe kaum aktiv auf dem Markt lenkend eingreifen. Sie vermag es nicht einmal für sich selbst neue Maßstäbe beim die Ressourcen schonenden Umgang mit der Umwelt Zeichen zu setzen.

Kann sich die Gemeinde aber vielleicht indirekt beteiligen?

Die Frage nach dem Nutzungsentgelt und der Förderung für die Abwasserwärme könnte anders formuliert werden, wenn die Abwassergebührenquellen umfassender, also nicht nur auf den rein stofflichen Entsorgungszweck, sondern auch auf den ökologisch dringend wünschenswerten Energieentzug aus dem Abwasser ausgeweitet formuliert würden.

Ist zudem nicht aus der Monopolstellung und der Verantwortung der Gemeinde für das Wohl der Gemeinde auch eine Pflicht abzuleiten, die bislang ungenutzte Energiereserve zu vertretbaren Konditionen potenziellen Nutzern

der Energie, vergleichbar mit den Regelungen des Berggesetzes, zur Verfügung zu stellen, um dadurch Umweltgefahren durch Überhitzung und langfristig durch Mangel an Rohstoffen aktiv und damit auch gebührentauglich entgegenzuwirken?

In diesem Sinne kann nach Auffassung des Autors die Gemeinde nicht nur als Abwasserreinigungsanlagenbetreiber verpflichtet werden, sondern eventuell auch als Betreiber von Anlagen für den Wärmewiederentzug und die Bereitstellung der Wärme zu umweltgerechten Zwecken z.B. in Form der Gebäudeheizung.

Unter dieser Betrachtungsweise scheint es denkbar, dass der Eigenbetrieb Stadtentwässerung oder eine andere städtische Firma (auch badenova zu Anteilen der Gemeinde Freiburg) unter Inanspruchnahme der Abwassergebühren Kanalwärmetauscher an geeigneten Stellen im Kanalnetz einbaut und die daraus gewonnene Wärme kostenneutral Anliegern zu Gebäudeheizzwecken oder zur Erwärmung von Badewasser zur Verfügung gestellt wird. Kostenneutral heißt ohne indirekte Bevorteilung des Vertragsnehmers.

Die Finanzierung über Abwassergebühren stellt sicher, dass die Anlagen dem Gemeinwohl verpflichtet sind. Es ist auch gesichert, dass die Mittel zweckgebunden und langfristig investiert werden.

Die Anlagen können dadurch über den bislang für den Kanal praktizierten Abschreibungszeitraum von 66 Jahren refinanziert werden. Der Wettbewerbspreis der spezifischen Wärmeerzeugungskosten kann auf diese Weise drastisch abgesenkt werden und erreicht mit ca. 45 EUR/MWh damit eine wettbewerbstaugliche Preisregion, die schon jetzt eine Investition sinnvoll macht.

Könnte die Stadt die Kanalwärme selbst anbieten, dann werden außerdem enorme Einsparungspotenziale beim Bau der Anlagen erwartet. Bei der Erneuerung der bestehenden Kanalisation besteht ein sehr beträchtlicher Spielraum bei der zeitlichen Festsetzung, wann welcher Kanal in einer bestimmten Schadensklasse innerhalb der Stadtgrenzen saniert wird. Auf diese Weise kann mittelfristig eine Abstimmung mit der Stadtplanung, den Siedlungsgesellschaften und anderen potenten privaten Investoren erfolgen. Die Aussicht auf die Realisation würde gegenüber dem heutigen Zustand drastisch verbessert.

Wie jetzt festgestellt wurde, ist diese Idee in der Stadt Wien in ähnlicher Form bereits seit 2006 umgesetzt. Kanal Wien ist selbst als Investor und Betreiber einer Anlage aufgetreten.

Die beschriebene Rechtsauffassung bedarf der Prüfung. Insbesondere die Frage der Gebührenfinanzierung ist zu untersuchen. In der Schweiz ist eine entsprechende, geringfügige kantonale Gesetzesanpassung erforderlich. In Freiburg erfolgt die rechtliche Anpassung auf Satzungsebene. Für den Zweck müssten die Aufgabenbereiche der Stadtentwässerung um die Entsorgung der Kanalwärme und deren Bereitstellung zu gemeinnützlichen Zwecken erweitert werden.

Sofern die Stadt tatsächlich selbst als Investor und Betreiber auftreten wollte, ist die Finanzierung über die Anpassung des Abschnittes Gebühren entsprechend zu regeln. Wenn die öffentliche Hand selbst die Kanalwärme ab Abwassersammler bereit stellt, entfällt die Notwendigkeit zur Förderung und alle damit verbundenen Bedenken. An deren Stelle treten die berechneten, wettbewerbsneutralen Wärmeliefergebühren.



Die Fragen, ob darüber hinaus weitere Anpassungen bei der Kanalbeitragsrechnung (Globalberechnung) und bei anderen, die Technik und den Betrieb der abwassertechnischen Anlagen betreffenden Bereichen notwendig sind, muss ggf. noch näher untersucht werden.

G SCHLUSS UND AUSSICHT

Die durch die Forschung und Wirtschaftsinstitute prophezeite Entwicklung zunehmend kritisch werdender Weltenergiequellen und die zunehmend real erfahrbaren Auswirkungen des nach wie vor verschwenderischen Umgangs mit den Bodenschätzen und der damit einhergehenden, globalen klimatischen Verschlimmerungen, stimmen mittlerweile jeden Bürger nachdenklich. Selbst konservative, monetaristisch orientierte Unternehmen und wenig bewegliche Politiker kommen zur Einsicht, dass die Installation von energetisch konventionell betriebenen Klimaanlage keine Lösung für die drängende Frage ist.

Das Prinzip Kanalwärmenutzung ist eine Form der Energieeinsparung durch Abwärmevermeidung bzw. Wärmerückführung mit einem Einsparungspotenzial von Energie aus fossilen Rohstoffen und treibhauswirksamen Schadstoffen in einer Höhe von bis zu 40 %.

Die Kanalwärmenutzung ist im Vergleich z.B. zur Geothermie eine örtlich sehr naheliegende und investiv unkritische Form der Energiebereitstellung.

Im Gegensatz zu den meisten Kombinationen aus Heiz- und Kühltechnik ist die Kanalwärmenutzung nicht nur unter ökologischer Sicht im Vorteil, weil sie generell auch den Kältebedarf energetisch aus Wärmerecycling bezieht. Sie weist besonders an dieser Stelle ökonomische Vorteile gegenüber den konventionellen, monovalenten Techniken auf.

Der Kanalwasserwärmeentzug trägt zu einer Verminderung der Wärmeüberlastung von Grund- und Oberflächengewässer bei.

Im Sinne des intelligenten Umgangs mit den vorhandenen Energiequellen ist es unverzichtbar, alle denkbaren Energiequellen zu untersuchen und im Nutzungsreservoir der Stadt zu berücksichtigen.

1 Bewertung Ergebnisse und Forschungsbedarf

Kenntnisstand

Die Qualität der bislang vorliegenden Untersuchungen zur Kanalwärmenutzung ist unterschiedlich. Als weitgehend erforscht darf die Auswirkung des Wärmeentzugs auf den Kläranlagenbetrieb bezeichnet werden. Dieser Faktor ist in Freiburg oder Basel im Rahmen der Möglichkeiten zur Realisation einer Anlage völlig unbedenklich.

Ebenso ausreichend sind die notwendigen Erkenntnisse über die Möglichkeiten, dem Abwasser über Wärmetauscher die Wärme zu entziehen. Seit einigen Jahren werden mehrere Anlagen erfolgreich betrieben: In der Schweiz 9, in der Bundesrepublik Deutschland 5 und in Österreich 1. Die Technik der Wärmepumpen wird in den letzten Jahren sehr umfangreich erforscht und hat eine beachtliche Reife mit hoher Zuverlässigkeit und mit geringem Betriebsaufwand erreicht. Die Wärmequelle für die Wärmepumpe muss einfach durch den Wärmekreislauf im Kanal ersetzt werden, um die Gesamtanlage für diesen Bereich anzupassen.

Die vorliegende Arbeit fasst den Stand der Erkenntnisse zusammen und versucht diese auf die Problemstellung in Freiburg anzuwenden. Dabei wird nach offenen Fragestellungen geforscht. Insbesondere wird untersucht, welches die kritischen Beschränkungen oder gar Mängel des Systems sind.



Durch den konkreten Bezug auf denkbare und zugleich realistische Einzelprojektierungen von Kanalwärmennutzungsanlagen in Freiburg wird mit der vorliegenden Studie das Potenzial realistischer dargestellt, als die bekannten Globalstudien anderer Städte. Die Rahmenbedingungen zur wirtschaftlichen Nutzung werden im Vergleich zu anderen Studien teilweise enger und kritischer gefasst.

Die Auswertungen konkretisieren die Vielzahl der Restriktionen zu Planung, Bau und Betrieb der Anlagen und ermöglichen eine Aussicht auf denkbare, weitere Entwicklungen zu diesem Thema.

Übertragbarkeit Ergebnisse

Die vorliegenden Erkenntnisse sind an verhältnismäßig konkret projektierten Einzelobjekten mit eingehender Berücksichtigung von wichtigen Einzelfaktoren gewonnen worden. Aus diesem Grund darf angenommen werden, dass die Potenzialabschätzung als realistisch eingeschätzt wird.

Die Untersuchung geht auch in dieser Hinsicht über die bislang vorliegenden Abschätzungen in anderen, vergleichbaren Städten hinaus.

Die Übertragung der Erkenntnisse ist vor allem vom örtlichen Energiepreis abhängig. Sie scheinen aber grundsätzlich für eine allgemeinere Einschätzung der Technik und seiner Einsatzpotenziale auch in anderen Orten geeignet.

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit wurden zahlreiche Abschätzungen vorgenommen, die im Einzelfall am konkreten Vorhaben zu überdenken sind. Durch die Darstellung der sich auf den Preis auswirkenden Einzelfaktoren wird aber eine Bandbreite der Wirtschaftlichkeitsbedingungen angeboten, bei der auch neue Entwicklungen in der Technik grundsätzlich mit eingeschätzt werden.

Weiterer Forschungsbedarf

Der Bedarf an weiteren Untersuchungen und die Notwendigkeit der systematischen Dokumentation von Messreihen an konkreten Projekten als Grundlage für die qualitative und quantitative Beurteilung insbesondere der wirtschaftlichen Grundlagen, hat sich mit der Studie bestätigt.

Konkret werden weitere Untersuchungen in folgenden Bereichen vorgeschlagen:

1. Kontinuierliche Messung der Abwasserwärmemengenbereitstellung (Temperatur und Abflussmenge) an konkreten Stellen im Kanalnetz (nicht nur am Kläranlagenzulauf).
2. Beeinflussung der nächtlichen Minimaltrockenwetterabflüsse auf den Betrieb der Heizungs- und Kühlanlage.
3. Abwassertemperaturverhalten und Wärmepumpenleistung an hochsommerlichen Tagen bei Kältebetrieb.
4. Tatsächliche, möglichst vollständige und langfristige Aufzeichnung und systematische Auswertung der betrieblichen Daten von Pilotanlagen. (Dafür eignet sich eine eigene Anlage am besten. Messdatenpunkte z.B. wie im Plan Abb. 24 dargestellt).
5. Kennzahlenermittlung von gasbetriebenen Kompressionswärmepumpen im praktischen Betrieb.
6. Untersuchung der Rekombinierbarkeit der Anlagenteile insbesondere mit Kraft-Wärmekopplung.
7. Ermittlung der Wirtschaftlichkeit des Kälteanlagenteils und Auswirkungen auf die Gesamtwirtschaftlichkeit der Anlage.
8. Klärung der Frage, ob und wann eine Kombination von Warmwasseraufbereitung und Heizwassererwärmung sinnvoll ist.
9. Rechtliche Klärung, in wie weit und unter welchen Bedingungen der Kanalnetzbetreiber, ggf. in Eigenregie, Investitionen zur Ableitung der Abwasserwärme tätigen, und diese gegen Entgelt zur Verfügung stellen darf.

2 Gesamtpotenzial in Freiburg

Das tatsächliche, absolute Wärmenutzungspotenzial aus Kanalwasser in Freiburg kann nicht genannt werden, weil die effektive Nutzung von vielen ungewissen Faktoren, ganz besonders aber von der Investitionsbereitschaft von Betreibern abhängt.

Es sind jedoch folgende Randbedingungen im Wärmeangebot definiert:

- Wärmenutzungsanlagen können auf eine Kanalstrecke von 31 km verteilt mit hohem Nutzungspotenzial eingebaut werden. Auf weiteren 33 km Kanallänge ist das Angebot mit Einschränkungen verbunden.
- Die bereitstellbare, wirtschaftlich nutzbare Energiemenge beträgt 56.000 MWh pro Jahr.
- Um diese Energie zu nutzen, müssten auf einer Strecke von ca. 5 km Wärmetauscher im Kanal eingebaut werden.
- Unter den berechneten wirtschaftlichen Grenzbedingungen sind bei einer durchschnittlich projektierten Anlagengröße von 780 MWh/a insgesamt ca. 70 Wärmenutzungsanlagen notwendig, um dieses Potenzial auszuschöpfen.
- In der Werbung zur Kanalwärmennutzung werden Potenziale von bis zu 5% des Wärmegesamtbedarfs der Stadt verkündet. Unter realistischen Bedingungen sind in Freiburg dagegen nur wenige Anlagen



überhaupt denkbar.

Der theoretisch mögliche Nutzanteil am derzeitigen Gesamtenergiebedarf für Haushalte (1.285 GWh/a), städtische Einrichtungen (95 GWh/a) sowie für Gebäude von Gewerbe- Handel- und Dienstleistungen (1.540 GWh/a) beträgt für Freiburg 2%. [Klimaschutz-Strategie Freiburg 2007] Der Anteil „regenerativ“ erzeugter Wärme ließe sich hiermit von derzeit ca. 66,6 GWh/a theoretisch auf ca. 4% fast verdoppeln.

- Die potenziellen Standorte zur Kanalwärmenutzung verteilen sich überwiegend auf der Ost-Westachse und entlang den übrigen Hauptabwassersammlern.

Nach den Aussagen des beauftragten Ingenieurbüros zur Darstellung der vorgestellten Technik gilt als sicher, dass an mindestens 15 bis 20 Standorten in Freiburg der wirtschaftliche Betrieb einer Anlage zur Wärmerückgewinnung aus Rohwasser möglich ist.

Diese Erwartung hat sich bis auf Weiteres nicht bestätigt. Die Realisation eines Projektes setzt, abgesehen von den wirtschaftlichen Interessen der potenziellen Investoren, eine Koinzidenz von mehreren Standortfaktoren wie geeigneter Abwasserkanal in Nähe der Heizzentrale, ein Mindestbedarf an Anlagengröße und den möglichst ganzjährigen Wärme- und/oder Kältebedarf voraus.

Sofern es gelingt, ein ganzes Baugebiet wie z.B. das Güterbahnareal Nord zu versorgen, dann besteht aber die Chance eines essenziellen Beitrags zur Bruttoenergiebilanz von Freiburg.

Beschränkt sich die Nutzung auf einzelne Anlagen umweltbewusster Bauherren, dann bleibt der Beitrag mittel bis langfristig unterhalb von ca. 8.000 MWh/a (bis 10 Anlagen).

Bei einer Energiepreissteigerung auf 150% proportional zum heutigen Gaspreis sind die wichtigsten ökonomischen Bedingungen für den Neubau einer Anlage gegeben.

3 Aussichten und Empfehlung

Nach den vorliegenden Erkenntnissen ist der Nachweis der Wirtschaftlichkeit im laufenden Betrieb einer Pilotanlage noch nicht erbracht. Erst nach weiterem Anstieg der Energiepreise ist die Wirtschaftlichkeitsgrenze erreicht. Außerdem ist in den nächsten Jahren mit einer deutlich zunehmenden Konkurrenz alternativer Techniken der Wärmebereitstellung und mit einem energetisch deutlich effizienteren Umgang mit den vorhandenen Ressourcen zu rechnen.

Der fehlende Anreiz zur Realisation der neuen Technologie wird, abgesehen von den geringen anfänglichen ökonomischen Vorteilen, durch die zunächst vielleicht höheren Betriebsrisiken im Vergleich zu konventionellen Anlagen nochmals ungünstig verstärkt.

Im Gegensatz zur Wärmenutzung im Netz besteht bei der Nutzung von Wärme aus Abwasser im Anschluss an die Reinigungsstufen von Kläranlagen ein beträchtliches Potenzial. Das Temperaturniveau ist mit rund 15° bis 20°C noch um einiges höher als im Zulauf zur Kläranlage. Die Reinigungsleistung der Anlage kann durch den Wärmeentzug gar nicht erst negativ beeinflusst werden. Der Wärmeentzug ist hinsichtlich der Belastung der Gewässer ökologisch äußerst sinnvoll. Und nicht zuletzt ist das infrastrukturelle Umfeld meist wesentlich günstiger als an irgendeiner anderen Stelle im Kanalnetz. Auch die Eigentumsverhältnisse und die vertragsrechtlichen Fragen sind sehr leicht zu lösen.

Entscheidend einschränkendes Kriterium für die Wirtschaftlichkeit der Wärmerückgewinnung ist an dieser Stelle aber die Abnahmeseite. Kläranlagen haben ihren Standort aus Emissionsschutzgründen, besonders in Deutschland, traditionell außerhalb der Siedlungen.

Bevor solche Investitionen angegangen werden, sind zuvor aber zuerst noch die Anlagen der Wärmenutzung aus den Vergärungs- und Verbrennungsprozessen zu optimieren. Hier bestehen mancherorts einige Investitionsrückstände.

Aus technischer und ökologischer Sicht darf zusammengefasst werden, dass der mögliche Wärme-/Kälteentzug aus Abwasser sich weitgehend prozyklisch zum Dargebot an Energie verhält. Das gilt besonders für das Wärmemengenangebot im Abwasser. Die Tag-Nachtschwankungen können jedoch technisch ausgeglichen werden.

Im Gegensatz dazu ist das Energieangebot im Grundwasser von Anfang an sehr ausgeglichen bzw. durch die Trägheit des Bodenwasserkörpers sogar vorteilhaft zu nutzen und schier unendlich groß.

Der Preis für den Bau von Anlagen zur Wärmerückgewinnung aus Abwasser dürfte in aller Regel nicht günstiger sein als der für Erdbohrungen in den Grundwasserleiter. Im Gegensatz zu Letzterem bestehen aber höhere Kostenrisiken für Bau und Betrieb der Anlagen im Abwasserkanal. Die Abhängigkeiten bestehen darüber hinaus nicht nur auf baulicher Seite, sondern auch auf eigentums- und vertragsrechtlicher Seite und bei allen weiteren finanziell relevanten Faktoren.



Dieser Wettbewerbsnachteil kann am besten dadurch ausgeglichen werden, dass der Kanalnetzbetreiber selbst die Wärme ab Hausanschluss zur Verfügung stellt. Gebührenrechtlich kann die Investitionen dadurch begründet werden, dass zum einen der Wärmeentzug als eine weitere, notwendige Teilleistung der Abwasserbehandlung zu betrachten ist und zum anderen die Leistung ähnlich der Abwasserableitung und Abwasserbehandlung nach wasserrechtlichen Gesichtspunkten als eine hoheitliche Aufgabe mit gesellschaftlicher Leistungsbindung definiert werden kann. Die gesetzlichen und administrativen Voraussetzungen dafür müssen ordnungsrechtlich aber erst geschaffen werden.

Die Energie für den Pumpenbetrieb kann bei Kleinanlagen aus Strom, bei größeren sollte sie vor allem aus Gas bezogen werden. Hier sind besonders wichtige Impulse auf der Seite der Wärmepumpentechnik zu erwarten. Die Kraft-Wärme-Kupplung in der konventionellen Bauweise mit Gasmotor und Stromgenerator ist bewährt. Aber erst mit der kombinierten Nutzung von sekundären Wärme- und Kältequellen aus Abwasser oder Boden wird ein ökologisch relevanter Beitrag zur Reduzierung der Ressourcenverschwendung und der CO₂-Emissionen geleistet.

Trotz aller genannten Einschränkungen empfiehlt der Autor badenova, ein Pilotprojekt zu realisieren. Die Voraussetzungen für den Erfolg eines Projektes sind in Freiburg besser als an vielen anderen Standorten der Bundesrepublik:

1. Die Stadt Freiburg subventioniert durch die praktizierte Sanierungsstrategie (Erneuerung statt Innensanierung der bestehenden Anlagen) indirekt die kostengünstige Installation von Wärmetauschern.

2. Im Haus badenova sind alle maßgeblich am Planungs- und Entscheidungsprozess beteiligten Personen und Instanzen unter einem Dach vereint (Gas-, Strom-, Wärme- und Abwassertechnik). Auch in dieser Hinsicht sind die Voraussetzungen zur erfolgreichen Realisation besser als an vielen anderen Standorten.
3. badenova verfügt über eingehende Erfahrungen bei der Installation von Blockheizkraftwerken. Wenn diese Technik lediglich um eine weitere Wärmequelle erweitert wird, müssen keine wirklich neuen und risikoträchtigen Sonderlösungen abgewogen werden.
4. Durch die zusätzliche Investition in die Wärmetauscher verschlechtert sich in kurzfristiger Sicht die Gewinnerwartung. Jedoch nur für eine begrenzte Zeit. Bei den stetig und sehr stark ansteigenden Gaspreisen wird der Break-even-Point schon in den nächsten Jahren erreicht.
5. Das Risiko der Anlage ist gering. Im Extremfall könnte nachträglich auf alternative Quellen wie Bodenwärme zurückgegriffen werden.

Die Chancen für ein Aufeinandertreffen der wichtigen Voraussetzungen für den wirtschaftlichen Bau einer Anlage sind dünn gesät. Der Wärmebedarf, der ausreichend große Abwasserstrom und der Investitionsbedarf einer neuen Wärmeerzeugungsanlage treffen nur in seltenen Fällen aufeinander.

Auch wenn im Augenblick der Einsparungseffekt durch den immer noch tiefen Gas- und Ölpreis die Investition in die Wärmetauscher und die zusätzliche Motorstufe für die Wärmepumpe erst bei längeren Laufzeiten amortisiert, so ist damit zu rechnen, dass die Anlage ab ca. 5 Jahre die zusätzlichen Kapitalkosten einfährt.

Bis zum Erreichen der Gewinnschwelle sollte auf die Verrechnung von Gebühren für die Wärmenutzung verzichtet werden. Auch danach scheint in der Regel eine Gewinnabschöpfung nicht sinnvoll, auch wenn diese aus gebührenrechtlicher Sicht möglich ist.

Es besteht die Möglichkeit der indirekten Subventionierung durch die Stadt Freiburg, vertreten durch den Eigenbetrieb Stadtentwässerung in der Weise, dass bei einer anstehenden Sanierung eines Kanals in der Regel das Altrohr ausgetauscht wird. Das geschieht meist in offener Bauweise. Für den Wärmeanlagenbetreiber entstehen also nur die Kosten für die zusätzliche Ausstattung der Rohre mit den Wärmetauscherelementen.

Bei kritischer Überprüfung der bereits in Freiburg, aber auch in anderen Orten durchgeführten Untersuchungen zum Nutzungspotenzial bestätigen sich die immer ähnlichen Hindernisse zur Realisation eines Projektes: Im Prinzip ist die Rückgewinnung von Wärme aus dem Kanalnetz eine sinnvolle Angelegenheit. In der praktischen Umsetzung ist sie ein Problem aus Gründen, die nicht unbedingt aus der Technik selbst herrühren.

Die Art der Wärmeerzeugung ist für potenzielle Betreiber im Vergleich zu anderen Techniken trotz der Verwendung weitgehend etablierter Technik und kalkulierbarer Wirtschaftlichkeit einfach zu wenig attraktiv, um vermeintliche Risiken einzugehen. Darüber hinaus bestehen bautechnische und wirtschaftliche Abhängigkeiten von zusätzlichen Bau- und Betriebspartnern, die grundsätzlich mehr Unsicherheit und Aufwand bei Projektierung und Administration bedeuten.

Ein deutlicher Impuls zur Bereitstellung eines nennenswerten Energie deckungsbeitrages ist voraussichtlich erst zu erwarten, wenn die öffent-



liche Hand selbst als Investor auftritt und Wärme zur Reduzierung der Gewässerbelastung kostenneutral an die Wärmeverbraucher zurückgibt.

Bei einer derzeit in Deutschland und in der Schweiz installierten Leistung von Wärme aus Kanal (ca. 6.000 MWh) wird nur ein symbolischer Beitrag geleistet. Nach Hochrechnung der vorliegenden Abschätzungen ist ein Ausbau dieser Energieversorgung insgesamt realistisch auf kaum mehr als 0,02% des Gesamtenergieverbrauchs der Bundesrepublik Deutschland mittelfristig ausbaubar. Damit wird die Begrenztheit der Möglichkeiten zur Rückgewinnung von Energie aus verbrannten, fossilen Energieträgern deutlich.

In den Städten ist der mögliche Anteil aber durch die örtlich Konzentration ganz wesentlich höher. Es wird geschätzt, dass dort in den nächsten Jahren bis zu knapp 1 Millionen MWh Wärmeleistung aus Kanalwärmenutzung realisiert werden können. Das entspricht ca. 1% des Gesamtenergiebedarfs privater Haushalte.

Laut Bericht des Ökoinstituts über die Klimaschutzstrategie der Stadt Freiburg sind die Möglichkeiten zu einer Absenkung des Primärenergieverbrauchs und zum Ersatz des Bedarfs mit umweltverträglichen Technologien deprimierend gering. Darf deshalb bei dieser Erkenntnis auf die Nutzung der Kanalwärme verzichtet werden?

Es wird für die nahe Zukunft erwartet, dass diese Wärme wirtschaftlich wettbewerbsfähig zu Heizzwecken bereit gestellt werden kann.

Das Recycling der Wärme ist ökologisch sinnvoll und zur Reduzierung der Gewässerwärmelastung wünschenswert. Der Beitrag zur Reduzierung des Bedarfs von Energie aus fossilen Brennstoffen und zur Minimierung des CO₂-Ausstoßes kann absehbar kostenneutral geleistet werden.

Im Vergleich zur Größe der für den gewählten Prognosezeitraum anstehenden Energieprobleme scheinen die bei einer Nutzung der Abwasserwärme bestehenden technischen und sozioökonomischen Beschränkungen gut lösbar.

Freiburg im August 2007
Burkard Hagspiel



Abbildungen, Bilder und Tabellen

Tabelle 1	Nutzbare Kanalnetzlänge Mischwassernetz Freiburg	4
Tabelle 2	Abschätzung der nutzbaren Kanalwärmekapazität in Freiburg	5
Tabelle 3	Vergleichstabelle realisierter Anlagen	18
Tabelle 4	Wirtschaftlichkeit der potenziellen Wärmeanlagen zur Kanalwärmenutzung	27
Abb. 1	Prinzip der Rückführung von Wärme aus dem Kanalnetz	1
Abb. 2	Prinzip der Wärmeerzeugung aus Abwasser	4
Abb. 3	Beispiel einer Tagesabflussganglinie (Beispiel Messstelle in Basel)	6
Abb. 4	Jahresentw. Abwassertemperaturen abh. von Außentemperatur u. Abflussmenge FR	7
Abb. 5	Periodenentwickl Abwassertemp. abhängig von Außentemperatur u. Abflussmenge BS	7
Abb. 6	Periodenentwicklung Grundwassertemperatur Basel 1995 bis 2006	8
Abb. 7	Jahresentwicklung Grundwassertemperatur Basel 2006	8
Abb. 8	Funktionsprinzip Plattenwärmetauscher nach Tichelmann	9
Abb. 9	Temperaturverteilung im Wärmetauscher	9
Abb. 10	Strömungsdiagramm eines Wärmetauschers	9
Abb. 11	Größerer Gerinneauftrag am Beispiel eines Edelstahlblecheinbaus	10
Abb. 12	Ganzflächig durchströmtes Wärmetauschermodul aus Edelstahlblech	10
Abb. 13	Gestaltung Wärmetauschermodul (Wien Kanal MA 30)	10
Abb. 14	Nachträgliches Einschleiben von Wärmetauscherelementen	10
Abb. 15	Auf Gleitkufen einführbare Wärmetauscherelemente für Großprofilrohre	11
Abb. 16	Unterseite der für Einlage in die Rohrschalung vorgesehene Wärmetauscherelemente	11
Abb. 17	Stehend hergestelltes Kanalrohr mit exzentrischer Schalung zum Wärmetauschereinbau	11
Abb. 18	Einbringung der Wärmetauscher durch einen bestehenden Schacht	12
Abb. 19	Beispiele realisierter Rohrbautypen	12
Abb. 20	Beispiel offen geführte Ein- und Ausleitung der Zubringerleitungen	14
Abb. 21	Schema gasbetriebene Absorptionswärmepumpe	15
Abb. 22	Beispiel gasbetriebenen Kompressionswärmepumpe	15
Abb. 23	Empfohlene Heizleistung und Jahresheizarbeit Gaswärmepumpe	15
Abb. 24	Einbindung von Kanalwärmetauscher, Gaswärmepumpe, Pufferkessel und Heizkessel	16
Abb. 25	Vollst. Anlagenzusammenstellung Kälte- Wärmeproduktion u. Fernwärmeanbindung	17
Abb. 26	Biofilmbildung nach Ablauf von 16 Tagen	19
Abb. 27	Beispiel für ungünstige Wärmetauschergestaltung aus kanalbetrieblicher Sicht	19
Abb. 28	Beispiel für günstige Integration des Tauschers mit Banketten	20
Abb. 29	Jahresdauerlinie u. Auslegung Wärmepumpe für zentrales Wärmeversorgungsnetz	20
Abb. 30	Raumbedarf 1.000 kW Wärmepumpenanlage	21
Abb. 31	Für nachträgliche Installation Wärmetauscher ungeeigneter Rohrquerschnitt	22
Abb. 32	Anpassung von Kanalerschließungsplanung und Wärmenutzung	22
Abb. 33	Primärenergieverbrauch Vergleichstabelle	23
Abb. 34	Standardvergleich treibhauswirksame Stoffe, Schwefeldioxid und Kohlendioxidausstoß	24
Abb. 35	Kohlendioxid-Emissionen der verglichenen Wärmeanlagentypen	24
Abb. 36	Gesamtenergiebilanz / Energieflussschema	25
Abb. 37	Abhängigkeit Spez. Wärmegestehungspreis von wesentlichen Wirtschaftsfaktoren	28
Abb. 38	Abhängigkeit Spez. Wärmegestehungspreises von Anlagengröße	29
Abb. 39	Nomogramm zur Ermittlung realisierbarer Leistungszahl	31
Abb. 40	Schema für das Wärmecontracting	34
Abb. 41	Liefergrenzen beim Wärmecontracting	35
Abb. 42	Zentrale Wärmeanlagen und sonstige nachhaltige Energieversorgungen in Freiburg	36
Abb. 43	Vergleich erforderliche Investitionen verschiedener Heiztechnik	37
Abb. 44	Abhängigkeit Spez. Wärmegestehungspreises von Ausbaugrad u. Wärmeabnahme	37
Abb. 45	Pot. Anzahl Kanalwärmenutzungsanlagen in Abhängigkeit Wärmegestehungspreis	38
Abb. 46	Entwicklung Defizite Spez. Wärmegestehungspreis	40



Anhänge

BAND I

Allgemeine Projektunterlagen

B. Hagspiel: Projektbeschreibung und Antrag auf Gewährung einer Förderung aus dem Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz der badenova AG & Co. KG, Freiburg i.Br. 2002-10

Innovationsfond, badenova AG & Co. KG: Projektantrags- und -bewilligungsunterlagen, Freiburg i.Br. 2003-01

B. Hagspiel: Angebotsaufforderung und Beauftragung für ‚Evaluationsstudie und Konzept zur Nutzung von Wärme aus Abwasser‘, Freiburg i.Br. 2003-04

Evaluationsstudie zu Abwasserwärmennutzungsprojekten

U. Studer, B. Fischer, Studer + Partner AG: Evaluationsstudie Projekte Wärmenutzung aus Abwasser, Zürich 2003-12

Potenzialstudie zu Gesamtwärmenutzung aus Abwasser in Freiburg
Wärmeversorgungsstudie Güterbahnareal Nord in Freiburg

Ch. Koopmann, Beller Consult und A. Berghoff, planerwerkstatt A. Berghoff, Hölken-Berghoff: Potenziale zur Abwasserwärmennutzung in Freiburg, Schlussbericht, Freiburg i.Br. 2005-06

U. Studer, Studer + Partner AG: Güterbahnareal Nord, Wärmeversorgungskonzept Teil 1, Zürich 2003-07

U. Studer, Studer + Partner AG: Güterbahnareal Nord, Wärmeversorgungskonzept Teil 2, Zürich 2003-10

U. Studer, Studer + Partner AG: Güterbahnareal Nord, Wärmeversorgungskonzept Teil 3, Zürich 2003-10

Eproplan GmbH: Energiekonzept zur künftigen Wärmeversorgung des Güterbahnareals Nord in Freiburg, Stuttgart 2003-11

Wärmeversorgungsstudie Marienhaus St. Johann in Freiburg

A. Berghoff, planerwerkstatt Hölken-Berghoff: Realisationsstudie Wärmeerzeugungsanlage aus Abwasser für Marienhaus St. Johann e.V. Freiburg, Freiburg i.Br. 2003-10

W. Schmidt, K. Preiser: Angebot Wärmeerzeugungsanlage für Marienhaus St. Johann e.V. Freiburg, Freiburg i.Br. 2003-11

BAND II

Weitere Unterlagen Technik

U. Studer: Abwasserwärmerückgewinnungsanlage Technologiezentrum Singen, Erläuterungsbericht anlässlich Schlussexkursion, Singen 2006

B. Hagspiel: Auswertungen zur Anfrage an den ATV-DVWK-Erfahrungsaustausch der Großstädte, Rostock 2003-06 und 2007-8

Schlussbericht Innovationsfondprojekt Offenburg: Potenzialabschätzung der nutzbaren Abwasserwärme an öffentlichen und privaten Gebäuden in Offenburg

Medinstplan AG: Abwärmennutzung aus Abwasserkanal für das Schulzentrum Nord-West in Offenburg, Nussbaumen 2002-07

Dr. L. Rometsch, Institut für Unterirdische Infrastruktur: Wärmegewinnung aus Abwasserkanälen, Gelsenkirchen 2004-12

Dr. L. Rometsch: Energie aus Abwasserwärme: Ökonomische Randbedingungen und Lösungsansätze, Gelsenkirchen 2006



Weitere Unterlagen zur Technik

BAND III

E.A. Müller, Büro eam: Wärmenutzung aus Abwasserkanälen, eine regenerative Energiequelle mit großem Potenzial, Zürich 2003-03

E. A. Müller Büro eam: Abwasserwärmenutzung in der Schweiz, Erfahrungen konkreter Objekte und Einsatzmöglichkeiten, Zürich 2003

IBS Ingenieurbüro Schuler GmbH: Tagungsband Energiegewinnung mit Abwasserwärme, Wiesloch 2002-11

Deutsche Bundesstiftung Umwelt: Energie aus Kanalabwasser, DBU-Leitfaden für Ingenieure, Osnabrück und Bern 2005-11

Bundesamt für Energie BFE: Heizen und Kühlen mit Abwasser, Ratgeber für Gemeinden und Bauherren, Bern 2005-10

O. Wanner, Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG): Forschungsbericht zur Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen, Dübendorf 2004-09

O. Wanner, Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG): Biofilme vermindern die Wärmerückgewinnung, EAWAG-News, Dübendorf 2005-12

S. Piller, V. Litzka, T. Steffan, M. Kruse: Potenzialstudie zur Abwasserabwärmenutzung in Bremerhaven, Bremerhaven 2004-01

Amt für Umwelt und Energie Basel AUE, Ch. Dups, Gruneko AG: Heizwärme aus Kanalisation im Kanton Basel-Stadt, Basel 2000-07

Gemeinderat Binningen: Orientierung über die Kanalabwärmenutzung Baslerstrasse durch die WBA, Binningen 2003-06

ewz Energieleistungen: Wärmeverbund Wipkingen, Informationsschrift, Zürich 2003-12

badenova AG & Co. KG, Eigenbetrieb Stadtentwässerung Freiburg: Generalentwässerungsplan der Stadt Freiburg 2004.

Sandra Oppold: Einführung in die Abwasserwärmenutzung in bautechnischer, wirtschaftlicher und ökologischer Hinsicht. Diplomarbeit, Offenburg 2004-10 (nicht beigefügt)

Tillmann Klenk: Heizen und Kühlen mit Abwasser Grundlagen und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Diplomarbeit, Biberach 2007-01 (nicht beigefügt)

Stefan Schwörer: Wirtschaftlichkeitsprüfung einer bestehenden Wärmetauscheranlage zur Wärme- und Kälteversorgung aus Abwasser, Konstanz 2005-08 (nicht beigefügt)

Dipl.-Ing. Stefan Weber: Wärmetauscher im Kanal – Theoretische Grundlagen, Herausgeber: Dipl.-Ing. Horst Klinger, 2002



Literaturverweise

Energie Schweiz für Infrastrukturanlagen: Mustervereinbarung zur Abwasserwärmenutzung www.infrastructure.ch/dokumente/mustervereinbarung.doc

Ökoinstitut e.V.: Klimaschutzstrategie der Stadt Freiburg, Freiburg 2007

M. Würsten, AUE Kanton Solothurn: Leidfaden für Gemeinden und Energiestädte im Kanton Solothurn: Energierückgewinnung aus Abwasser. Solothurn 2007

Verweise im Internet:

<http://www.empa-ren.ch>

<http://www.energie.ch>

<http://www.gruneko.ch>

<http://www.singen.de>

<http://www.baulinks.de>

<http://www.asue.de>

<http://www.3sat.de>

<http://www.santec-gmbh.de>

<http://www.e2000.ch>

<http://www.ch-forschung.de>

<http://www.infrastrukturanlagen.ch>

<http://www.wien.gv.at/umwelt/klimaschutz>

Produktinformation Wärmetauscher Rabtherm, Therm-Liner Uhrig, Sonstige

Film Pilotprojekt Rabtherm Dortmund

Film Pilotprojekt Vattenfall Berlin

Präsentation Kanalwärmenutzung badenova

Präsentation Therm-Liner Fa. Uhrig