

# ENERGIE AUS KANALABWASSER



## Leitfaden für Ingenieure und Planer

## Inhalt

Vorwort	Seite 1
1 Funktionsbeschreibung der Abwasser-Wärmepumpe	Seiten 2-3
2 Potenzial und Einsatzmöglichkeiten, Ökologie und Wirtschaftlichkeit	Seite 4
3 Beispiele realisierter Anlagen	Seiten 5-6
4 Einfluss der Wärmeentnahme aus der Kanalisation auf den Betrieb von Kläranlagen	Seite 7-9
5 Grenzkriterien für die Sicherstellung des Kläranlagen-Betriebes	Seite 10
6 Hilfsmittel zur Überprüfung der Einhaltung der Grenzkriterien	Seite 11-12
7 Einfluss des Abwassers auf den Wärmetauscher	Seite 13
8 Bedingungen für den Einbau von Wärmetauschern in Kanälen	Seite 14
9 Wärmetauscher-Systeme	Seite 15-16
10 Praxistipps für Einbau, Betrieb, Wartung und Unterhalt von Wärmetauschern	Seite 17
11 Absprache zwischen Betreibern von Abwasserwärmenutzungsanlagen und Betreibern von Kanalisationen und/oder Kläranlagen	Seite 18
12 Contracting, Entschädigungen, Besitzverhältnisse, Schadens- und Haftungsregelungen	Seite 19
13 Dimensionierung von Abwasserwärmenutzungsanlagen	Seite 20-22
14 Praxistipps zur Wärmepumpentechnik	Seite 23-24
15 Potenzialstudien, Grobanalysen und Machbarkeitsstudien	Seite 26
16 Grundlagen für die Berechnung von Energie- und CO <sub>2</sub> -Bilanzen	Seite 26
17 Grundlagen für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit	Seite 27
Adressen für weitergehende Informationen und Beratung	Seite 28

## Impressum

### Projektleitung, Redaktion:

Arbeitsgemeinschaft

Ryser Ingenieure AG, Engestrasse 9, CH-3000 Bern 9

Institut Energie in Infrastrukturanlagen, Lindenhofstrasse 15, CH-8001 Zürich

ECO.S Energieconsulting Stodtmeister, Tempelhofer Ufer 1a, 10961 Berlin

### Autoren:

René Buri (Dipl. Umweltingenieur ETHZ, Ryser Ingenieure AG)

Beat Kobel (Dipl. Bauingenieur HTL/Dipl. Betriebswirtschaftsingenieur HTL/NDS, Ryser Ingenieure AG)

gefördert durch



Deutsche Bundesstiftung Umwelt

### Das Projekt wurde gefördert durch die DBU

Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Postfach 1705, 49007 Osnabrück

Tel. (0541) 9633-0, Fax (0541) 9633-190

info@dbu.de, www.dbu.de

Umschlagsfoto:

Vorgefertigtes Abwasserkanalelement mit integriertem Wärmetauscher sowie Vor- und Rücklaufleitungen (eingesetzt in Winterthur-Wülflingen, Schweiz)

Bezug:

Download unter [www.dbu.de](http://www.dbu.de) oder [www.infrastrukturanlagen.ch](http://www.infrastrukturanlagen.ch)

Osnabrück/Bern, November 2005

## Vorwort

### Zukunftsenergie Abwasser

Verbesserte Wärmedämmung, eine neue Generation von gut isolierenden Fenstern und Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung lassen kaum mehr Heizwärme aus modernen Gebäuden entweichen. Doch auch bei energieoptimierten Gebäuden bleibt ein Wärmeleck: die Abwasserleitung. Das Wasser, das wir zum Duschen, Baden, Waschen und Putzen brauchen, fließt lauwarm in die Kanalisation. Zieht man in Betracht, dass moderne energieeffiziente Gebäude für ihre Heizung nicht mehr Energie benötigen als zur Warmwasserbereitung, erkennt man das gewaltige Abwärmepotenzial, das in unseren Abwasserkanälen schlummert.

Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) möchte dazu beitragen, dieses Potenzial zu nutzen. Die Technik ist entwickelt und effizient: Wärmepumpen ermöglichen es, die Energie aus dem Abwasser zurück zu gewinnen und zur Raumheizung und Warmwasserbereitung zu nutzen. Der Wärmekreislauf lässt sich auf diese Weise schließen. Eine Vielzahl von Beispielen in Deutschland und in der Schweiz belegt die Zuverlässigkeit dieser Technologie seit über 20 Jahren. Im Vergleich zu fossilen Energieträgern ermöglicht die Energienutzung aus Abwasser einen aktiven Beitrag zum Klimaschutz und zur Einsparung von Primärenergie.

Zudem beginnt sich die Wärmenutzung aus Abwasser zu lohnen. Wenn man den Gewinn für die Umwelt berücksichtigt, ist die Technologie schon heute wirtschaftlich. Jüngste Preiserhöhungen im Öl- und Gasmarkt belegen, wie wichtig es ist, vorzusorgen und in energiesparende Technologien zu investieren. Spätestens wenn eine Kanalsanierung ansteht, sollte die Abwasserwärmenutzung als ergänzende Maßnahme zur energiesparenden Wärmeversorgung größerer Gebäude oder Wohnsiedlungen in Erwägung gezogen werden.

Der vorliegende Leitfaden informiert Ingenieure und Planer über diese junge Technologie und gibt wichtige Planungshinweise.



**Dr.-Ing. E.h. Fritz Brickwedde**

Generalsekretär der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

## 1 Funktionsbeschreibung der Abwasser-Wärmepumpe

Eine Wärmepumpe (WP) entzieht der Umwelt Wärmeenergie, die sie mit Hilfe eines geeigneten Kältemittels von einem niedrigen auf ein höheres, für Heizzwecke nutzbares Temperaturniveau bringt. Diese Umweltwärme kann je nach Wärmepumpentyp aus Wasser, aus der Umgebungsluft, aus dem Erdboden oder eben wie bei der Abwasser-Wärmepumpe aus dem Abwasser gewonnen werden. Dies geschieht entweder im Ablauf einer Kläranlage (KA) oder aus der Kanalisation vor der Kläranlage. Die Wärme im Abwasser stammt ursprünglich aus Abwärme von Industrie und Privathaushalten, die ins Abwasser abgegeben und mittels Abwasserwärmenutzung zurückgewonnen werden kann.

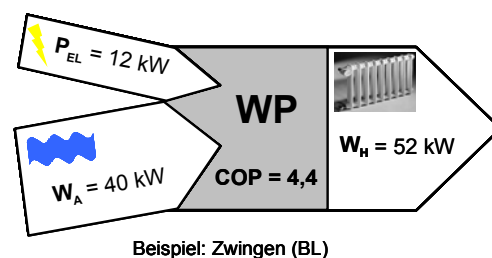
Mit der Abwasser-Wärmepumpe kann Heizwärme sowohl zu Heizzwecken als auch für die Bereitstellung von Warmwasser produziert werden. Im Sommer kann die Wärmepumpe umgekehrt als Kältemaschine eingesetzt werden. Durch diese Betriebsweise kann mit dem Abwasser also auch gekühlt werden.

Die Funktionsweise einer Abwasser-Wärmepumpe ist in Abb. 1 schematisch dargestellt und in der zugehörigen Legende beschrieben. Der Wärmetauscher (WT) ist mit einem zusätzlichen Wärmeübertragungskreislauf ausgerüstet, so dass der Verdampfer der Wärmepumpe nicht direkt mit der Wärmequelle Abwasser in Verbindung kommt. Der Wärmetauscher im Kanal trennt das verschmutzte Abwasser vom sauberen Heizsystem. Entsprechend dem aktuellen Stand der Technik werden Wärmepumpen mit ökologisch unbedenklichen Kältemitteln (FCKW-frei) eingesetzt (siehe Seite 24).

Liegen die einzelnen Wärmeverbraucher weit von der Wärmequelle bzw. der Kanalisation entfernt, wird die Wärme auf dem ursprünglichen Temperaturniveau (5-20 °C) in unisolierten Leitungen zur Heizzentrale mit der Wärmepumpe transportiert (kalte Fernwärme). Mit dieser kalten Fernwärme können relativ kostengünstig Distanzen bis über 1 km überwunden werden. Eine Abwasser-Wärmepumpe kann auch mehrere Gebäude zentral beheizen. In diesem Fall wird die Wärme in isolierten Leitungen auf höherem Temperaturniveau (35-65 °C) zu den einzelnen Verbrauchern transportiert (warme Fernwärme: Distanzen bis 100 m ideal, u.U. grössere Distanzen möglich).

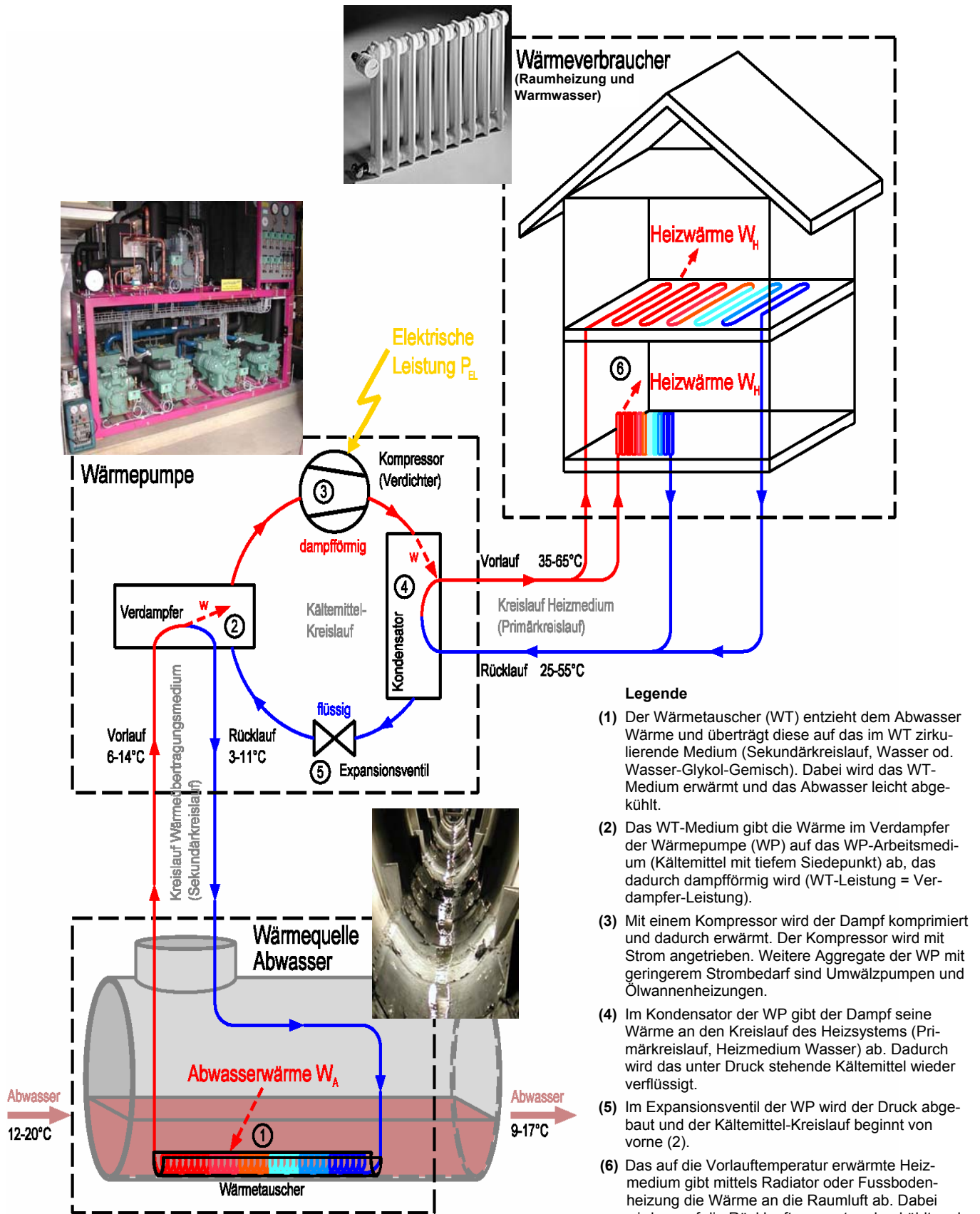
Meist wird für die Abdeckung von Wärmebedarfsspitzen an den kältesten Wintertagen zusätzlich zur Wärmepumpe ein Gas- oder Ölheizkessel eingesetzt (bivalente Wärmepumpen-Anlage). Damit kann die Betriebssicherheit erhöht und eine Abwasser- Wärmepumpe wirtschaftlicher betrieben werden, da sie lange Betriebszeiten erreicht und kleiner dimensioniert werden kann. In erdgasversorgten Gebieten ist die Kombination von Abwasser- Wärmepumpe mit Blockheizkraftwerk (BHKW) möglich. Dabei wird der Strom für den Antrieb der Wärmepumpe vom BHKW geliefert.

Die **Leistungszahl (COP)** einer Wärmepumpe ist das Verhältnis von Nutz- oder Heizleistung  $W_H$  (thermische Leistung) einer Wärmepumpe im Bezug auf die benötigte elektrische Antriebsleistung  $P_{EL}$  ( $W_H$  ergibt sich aus der Summe von  $P_{EL}$  und der Wärmeübertragungsleistung  $W_A$  des Wärmetauschers).



Wertet man die Energiedaten im Jahresverlauf aus, ergibt sich die Energieeffizienz einer Wärmepumpe durch ihre **Jahresarbeitszahl (JAZ)**, d.h. die erzeugte Nutzwärmeenergie (kWh) im Verhältnis zur benötigten Antriebsenergie (kWh) inklusive Hilfsenergien.

Die Wärmequelle Abwasser hat auch im Winter, wenn der Heizbedarf am grössten ist, relativ hohe Temperaturen im günstigen Bereich von 10-15 °C, was im Vergleich zu den üblichen Wärmequellen Luft, Erdreich oder Grundwasser höher ist und einen effizienteren WP-Betrieb ermöglicht. Abwasser-Wärmepumpen erreichen bei Neubauten gemessene JAZ von bis zu 5 und bei bestehenden Gebäuden Werte von bis zu 4.



**Abb. 1:** Schematische Darstellung einer Abwasser-Wärmepumpe mit Wärmeentzug aus der Kanalisation mit den wichtigsten Elementen und den drei geschlossenen Kreisläufen des Wärmeübertragungsmediums (Sekundärkreislauf), des Wärmepumpen-Arbeitsmediums (Kältemittel-Kreislauf) und des Heizmediums (Primärkreislauf).

## 2 Potenzial und Einsatzmöglichkeiten, Ökologie und Wirtschaftlichkeit

### Potenzial

Die im Abwasser enthaltene Wärmemenge wird heute grösstenteils als Abwärme ungenutzt in die Umwelt abgegeben. Das Nutzungspotential dieser Wärme ist sehr gross: Wenn wir Abwasser beim Wärmeentzug um lediglich 1 Kelvin abkühlen, können wir aus 1 m<sup>3</sup> Abwasser rund 1,5 Kilowattstunden Wärme gewinnen. Diese Wärme reicht in Deutschland theoretisch aus, um 5-10% aller an eine Kläranlage angeschlossenen Gebäude mit Heizwärme und Warmwasser versorgen zu können. Aus dem gleichen m<sup>3</sup> Abwasser kann in einer Kläranlage etwa 0,05 m<sup>3</sup> Klärgas erzeugt werden. Dies entspricht einem Energieinhalt von rund 0,3 Kilowattstunden (kWh). Mit anderen Worten: Das Potenzial an Abwärme im Abwasser ist um ein vielfaches grösser als das Potenzial an Klärgas auf den Kläranlagen.

### Einsatzmöglichkeiten

Das Wärmeangebot ist bei grösseren Kläranlagen meistens gross genug, wichtiger ist demnach die Frage nach geeigneten Abnehmern und Einsatzmöglichkeiten. Die Wärme kann entweder dem gereinigten Abwasser im Ablauf einer Kläranlage oder dem Rohabwasser aus der Kanalisation vor der Kläranlage entnommen werden, um damit umliegende Gebäude zu heizen. Bei der Wärmenahme vor der Kläranlage muss der Einfluss der Abkühlung auf den Kläranlagen-Betrieb berücksichtigt werden (s. Kapitel 4-6).

Unter Berücksichtigung der zwei grundlegenden Bedingungen, dass in einem Kanal ein genügendes Wärmeangebot für den Einsatz einer WP vorhanden und der Einbau von Wärmetauschern möglich ist, kommt die Nutzung von Abwasserwärme in der Regel für Abwasserströme ab 15 l/s, d.h. für Gemeinden ab rund 10'000 Einwohnern und in Kanälen mit einem Innendurchmesser von mindestens 800 mm in Frage. Geeignete Wärmeverbraucher sind grössere Gebäude oder Quartiere/Überbauungen in der Nähe der Wärmequelle für Heizwärme und Warmwasser im Leistungsbereich von 150 kW bis ca. 2 MW (bivalente Anlagen). Abwasser-WP sind also Grosswärmepumpen. Für Einfamilienhäuser und die Bereitstellung von Prozesswärme (meist hohe Vorlauftemperaturen > 70 °C erforderlich) sind Abwasser-WP nicht geeignet.

### Ökologie

WP nutzen Umgebungswärme. Sie sind deshalb im Vergleich zu fossilen Heizungen sehr umweltfreundlich. Auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen von WP sind im Vergleich zu herkömmlichen Heizsystemen wesentlich geringer (Abb. 2). Das CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzial von WP ist allgemein sehr gross: Ende 2003 waren in der Schweiz und Deutschland zusammen rund 100'000 WP in Betrieb, was einer Substitution von ca. 335 Mio l Heizöl pro Jahr, d.h. einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von rund 1 Mio t pro Jahr (ca. 1,8 %) entspricht. Das Reduktions-Ziel 2010 ist nach Kyoto-Protokoll 8%. Dazu können WP einen wichtigen Beitrag leisten. Gleichzeitig werden durch den Einsatz von WP in auch die Stickoxid (NO<sub>x</sub>)-Emissionen reduziert. Auch Abwasser-WP können also einen wichtigen Beitrag zur Verminderung des Treibhauseffektes und von örtlicher Smogbildung leisten.

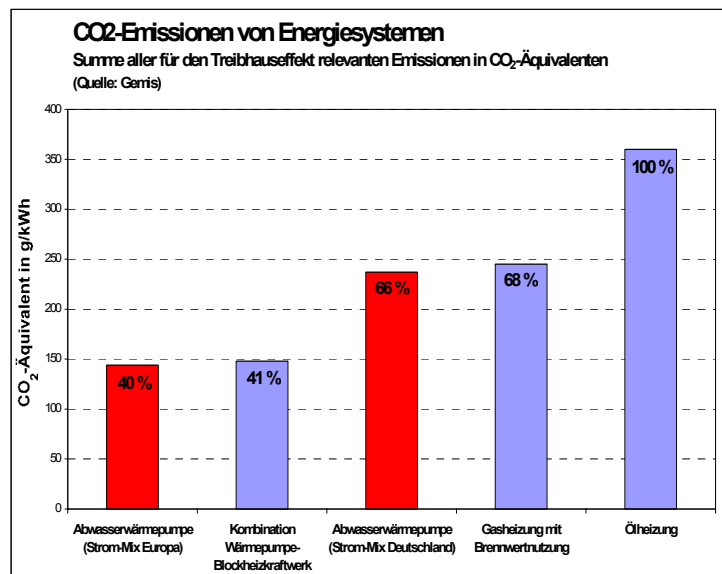


Abb. 2: Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Wärmepumpen im Vergleich mit konventionellen Heizsystemen

### Wirtschaftlichkeit

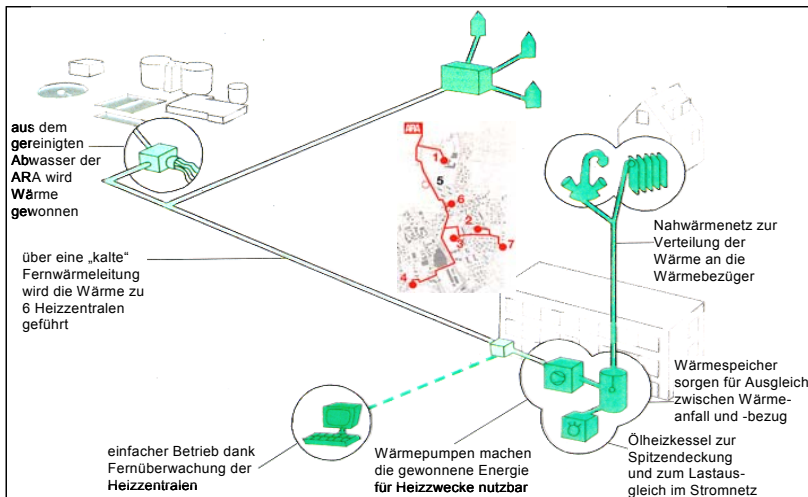
Für die Wirtschaftlichkeit einer Abwasser-WP ist grundsätzlich von zentraler Bedeutung, dass grosse Gebäude mit niedrigen oder normalen Vorlauftemperaturen angeschlossen werden können und die Distanz vom Ort der Wärmeentnahme bis zum Abnehmer möglichst klein ist („warme“ Fernwärme bis 200 m, „kalte“ Fernwärme bis über 1 km). Eine Abwasser-WP arbeitet grundsätzlich umso energieeffizienter, und damit auch umweltfreundlicher und kostengünstiger, je tiefer die Vorlauftemperaturen des Heizsystems und je höher die Temperaturen der Wärmequelle Abwasser sind. Wird der Einbau einer Abwasser-WP im Zusammenhang mit einer anstehenden Kanalsanierung geplant und realisiert, ergeben sich Kostensynergien. Die Wirtschaftlichkeit einer Abwasser-WP ist also stark abhängig von der Ausgangslage. Bei grösseren Abnehmern, geeigneter Leitungsführung und Vorlauftemperatur werden Abwasser-WP gegenüber konventionellen Erdöl- oder Erdgasheizungen wirtschaftlich interessant. Die bivalente Auslegung mit einem Spitzenkessel verbessert ebenfalls die Wirtschaftlichkeit.

### 3 Beispiele realisierter Anlagen

#### Praxisbeispiel Wärmeentzug aus dem Abwasser nach der Kläranlage

##### Muri (Kanton Aargau, Schweiz)

Seit 1994 versorgt die Energie Freiamt AG in der Gemeinde Muri (7'000 Einwohner) mittels verzweigtem Wärmeverbund von 3,2 km Länge über 7 dezentrale Heizzentralen 200 Wohnungen mit Wärme aus Abwasser. Die Wärme wird dem gereinigten Abwasser auf der Kläranlage mit einem kompakten Platten-WT entnommen und auf dem ursprünglichen Temperaturniveau als „kalte“ Fernwärme zu den Heizzentralen transportiert. Jede Zentrale verfügt über eine Wärmepumpe für die Erzeugung der Grundlastwärme und einen Ölheizkessel für die Spitzendeckung (bivalente Auslegung). Damit werden die umliegenden Gebäude über das ganze Jahr mit Heizwärme versorgt. Die Gesamtinvestitionen beliefen sich auf 2,6 Mio €. Der Wärmepreis beträgt 5,7 ct/kWh.



##### Kennzahlen Muri

Anzahl Wohnungen:	200
Wärmeproduktion WP:	1'700 MWh/a
therm. Leistung WP:	1'050 kW
Abmessungen WT:	1,5 x 1 x 0,5 m
Leistung WT:	700 kW

Abb. 3: Schema Fernwärmeverbund mit Abwasserwärme in Muri (AG)

#### Praxisbeispiele Wärmeentzug aus dem Abwasser in der Kanalisation (vor der Kläranlage)

##### Binningen (Kanton Basel, Schweiz)

Seit Ende 2001 versorgt die Wärmeversorgung Binningen AG (WBA) in der Gemeinde Binningen (14'000 Einwohner) 68 Gebäude mit verschiedener Nutzung (Schulhäuser, private und kommunale Bauten) in einem Wärmeverbund mit Wärme aus dem Abwasser der nahe gelegenen Kanalisation. Die Abwasserwärme wird mit einer zuverlässig arbeitenden zentralen WP in Heizwärme für Raumheizung und Warmwasser umgewandelt. Bisher konnte keine Verschmutzung des Rinnen-WT, d.h. keine Leistungsverminderung festgestellt werden. Es war noch keine Reinigung des WT erforderlich. Für den Kanalisations-Betreiber ergibt sich durch den WT kein zusätzlicher Aufwand. Die Funktion der Kanalisation wird nicht beeinträchtigt.



Abb. 4: Wärmetauscher im Kanal sowie Vor- und Rücklaufleitungen im Kontrollschacht in Binningen

##### Kennzahlen Binningen

Anzahl Wohnungen:	300
Wärmeproduktion WP:	2'400 MWh/a
therm. Leistung WP:	380 kW
Länge WT:	140 m
Breite WT:	0,80 m
Fläche WT:	110 m <sup>2</sup>
Leistung WT:	260 kW
spezif. Leistung WT:	2,4 kW/m <sup>2</sup>
Kanalart:	Mischkanalisation
Kanalform:	Beton, Eiprofil
Kanalgrösse:	1,80 x 1,20 m
Durchflussmenge $Q_{TW,min}$ :	200 l/s
Abkühlung im Kanal:	0,3 K

### Wipkingen (Kanton Zürich, Schweiz)

Pilotanlage im Auftrag der Elektrizitätswerke der Stadt Zürich (ewz). Mit 7 bivalenten WP-Heizzentralen werden mittels Nutzung von Abwasserwärme aus der Kanalisation (1,3 km lange Fernwärmeleitung) seit 1999 ca. 940 Wohnungen von 2 Baugenossenschaften und einer Versicherung beheizt und mit Warmwasser versorgt. Der Wärmepreis beträgt 5,3 ct/kWh. Anstoss für das Projekt gaben die Erneuerung der Abwasserleitung und verschiedene anstehende Heizkesselanierungen. Durch die WP werden 600'000 l/a Heizöl ersetzt (Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 1'500 t/a). Das Abwasser im Kanalabschnitt mit dem Wärmetauscher wird um maximal 2,0 °C abgekühlt. Im Zulauf der Kläranlage Werdhölzli resultiert eine viel geringere Abkühlung. Die Verantwortlichen der Kläranlage stimmten dem Projekt nach einer Überprüfung zu.



Abb. 5: Der 200 m lange Wärmetauscher vor und nach dem Eingiessen im Kanalisationsrohr in Wipkingen

#### Kennzahlen Wipkingen

Anzahl Wohnungen:	940
Wärmeproduktion WP:	3'100 MWh/a
therm. Leistung WP:	1'250 kW
Länge WT:	200 m
Breite WT:	1,00 m
Fläche WT:	200 m <sup>2</sup>
Leistung WT:	850 kW
spezif. Leistung WT:	4,2 kW/m <sup>2</sup>
Kanalart:	Mischkanalisation
Kanalform:	Beton, Kreisprofil
Kanalgrösse:	Ø 1,50 m
Durchflussmenge Q <sub>TW,min</sub> :	105 l/s
Abkühlung im Kanal:	2,0 K

### Zwingen (Kanton Basel, Schweiz)

Mittels zentraler WP werden 31 Einfamilienhäuser seit Anfang 1999 mit Wärme aus dem nahen Abwasserkanal beheizt (nur Raumheizung). Ein Flüssiggas-Brenner dient zur Deckung von Bedarfsspitzen. Planung, Bau und professionelle Betreuung der Anlage erfolgen im Contracting durch die Elektra Birseck Münchenstein (EBM). Bisherige Messungen ergaben eine durchschnittliche JAZ von 4,4. Die erwartete JAZ von 5 wurde wegen der Verschmutzung des WT nicht erreicht (stärker belastetes Abwasser wegen der angeschlossenen Papierfabrik). Die Abkühlung des Abwassers im betreffenden Kanal beträgt weniger als 0,1 K. Die ursprüngliche Funktion der Kanalisation wird nicht beeinträchtigt. Die Reinigung des WT liegt im Rahmen des Anlagenunterhalts in der Verantwortung des Contractors und wird in Absprache mit dem Kanalisationsbetreiber durchgeführt.

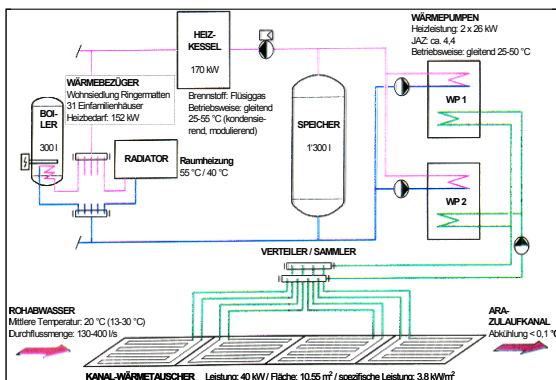


Abb. 6: Schema Abwasserwärmenutzung in Zwingen

#### Kennzahlen Zwingen

Anzahl Wohnungen:	31
Wärmeproduktion WP:	230 MWh/a
therm. Leistung WP:	52 kW
Länge WT:	10 m
Breite WT:	1,06 m
Fläche WT:	10,6 m <sup>2</sup>
Leistung WT:	40 kW
spezif. Leistung WT:	4,0 kW/m <sup>2</sup>
Kanalart:	Mischkanalisation
Kanalform:	Beton, Rechteckprofil
Kanalgrösse:	1,70 x 1,20 m
Durchflussmenge Q <sub>TW,min</sub> :	130 l/s
Abkühlung im Kanal:	0,1 K

### Bachgraben (Kanton Basel, Schweiz)

In der Sportanlage Bachgraben der Stadt Basel wurde 1982 eine WP-Anlage für die Beheizung der Garderobengebäude und die Erwärmung des Duschwassers in Betrieb genommen. Die WP nutzt die Wärme aus dem Abwasser der nahe gelegenen Kanalisation. Nach 20 Jahren störungsfreiem Betrieb wurde die Heizanlage erneuert. Die Tatsache, dass wieder eine WP installiert wurde, ist ein klares Indiz für die Zufriedenheit der Bauherrschaft und des verantwortlichen Wartungspersonals. Beim WP-Ersatz wurde auch der 30 m lange Rinnen-WT einer Funktionskontrolle unterzogen. Diese ergab keine Schäden oder Verschmutzungen, so dass der gleiche WT noch über Jahre wartungsfrei genutzt werden kann. Der WT in Basel Bachgraben muss nicht periodisch gereinigt werden. Seit der Inbetriebnahme bringt er die benötigte Leistung auch ohne Reinigung. Der Kanalisations-Betreiber hat also damit keinen vermehrten Aufwand und die Kanalisation erfüllt ihre ursprüngliche Funktion ohne Einschränkungen.

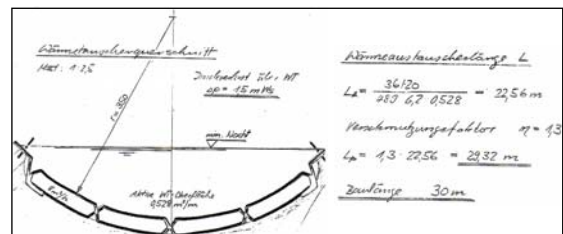


Abb. 7: Dimensionierungsskizze des Wärmetauschers in Basel



## 4 Einfluss der Wärmeentnahme aus der Kanalisation auf den Betrieb von Kläranlagen

Wie entwickelt sich die Temperaturabsenkung des Abwassers beim Wärmetauscher auf dem Weg bis zur Kläranlage (KA) und welchen Einfluss hat sie schliesslich auf den Betrieb der Kläranlage? Diese, für die Wärmeentnahme aus der Kanalisation vor einer Kläranlage zentralen Fragen, wurden von der EAWAG (Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz) im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Energie (BFE) detailliert untersucht<sup>1</sup>. Auf den Seiten 7-9 sind die wichtigsten Resultate und Schlussfolgerungen dieser Untersuchungen zusammengefasst. Aufgrund dieser Resultate wurden in Absprache mit dem VSA (Verband Schweizer Abwasserfachleute), dem AWEL (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich) und der EAWAG Grenzkriterien (Empfehlungen) erarbeitet (s. Kapitel 5) und es werden einfache Methoden zur Überprüfung der Kriterien aufgezeigt (s. Kapitel 6).

### Wärmeentnahme mittels Wärmetauscher in der Kanalisation

Die Temperaturabnahme  $\Delta T$  des Abwasserstroms (Einheit: K \*) ist abhängig von der entnommenen Abwasserwärme  $W_A$  (Wärmeübertragungsleistung des Wärmetauschers; Einheit: kW), der Durchflussmenge  $Q$  des Abwassers (Volumenstrom, Einheit: l/s), der Dichte  $\rho$  des Abwassers (kann bei Temperaturen von 0-20 °C als konstant 1 kg/l angenommen werden) und der spezifischen Wärmekapazität  $c$  des Abwassers (kann bei Temperaturen von 0-20 °C als konstant 4,19 kJ/kgK angenommen werden).

Es gilt: Je grösser  $Q$ , desto geringer  $\Delta T$  (Formel 1).

**Beispiel 1:** Bei  $Q = 25$  l/s und  $W_A = 100$  kW wird das Abwasser um 1 K abgekühlt.

**Beispiel 2:** Bei  $Q = 150$  l/s und  $W_A = 300$  kW wird das Abwasser um 0,5 K abgekühlt.

Die obigen Beispiele zeigen, dass bei grösseren Durchflussmengen dem Abwasser durchaus grosse Wärmemengen entzogen werden können, ohne dass die Abwassertemperatur um mehr als 1 K sinkt.

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

Formel 1

### Veränderung der Abwassertemperatur im Kanalisationsrohr

Beim Abfluss im Kanalisationsrohr findet über verschiedene Wege ein Wärmeaustausch zwischen Abwasser und Umgebung statt. Aus detaillierten Modellrechnungen des Abwassertemperaturverlaufs entlang eines Kanalisationsrohrs unter Einbezug der wichtigsten Prozesse (Abb. 8), mit mittleren Parameterwerten für eine typische Trockenwettersituation im Winter, können zusammengefasst drei relevante Schlussfolgerungen gezogen werden<sup>1</sup>:

1. Relevante Einflussgrössen auf die Abwassertemperatur sind die Temperatur nach dem Wärmetauscher (Ausgangstemperatur nach Wärmeentnahme), die Durchflussmenge sowie Temperatur und Feuchtigkeit der Kanalisationsluft.
2. Die natürlichen Wärmeverluste im Kanalisationsrohr liegen im Winter normalerweise in der Grössenordnung von 1 K.
3. Falls die Abwassertemperatur durch die Wärmeentnahme unter 8 °C sinkt, steigt sie über grössere Distanzen im Kanalisationsrohr wieder an, da das Erdreich im Winter wärmer ist (8-12 °C).

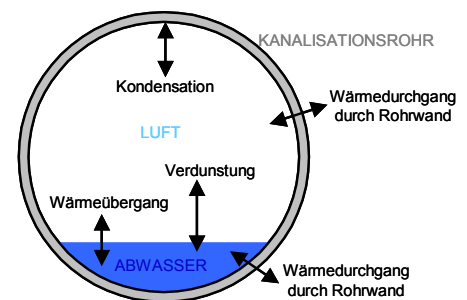


Abb. 8: Wärme-Austauschprozesse im Kanalisationsrohr

### Veränderung der Abwassertemperatur beim Zusammenfluss von Teilströmen

Die resultierende Abwassertemperatur  $T_{res}$  nach dem Zusammenfluss verschiedener Teilkanalnetze ist nur abhängig von den jeweiligen Durchflussmengen  $Q_i$  und Temperaturen  $T_i$  (Formel 2).

$$T_{res} = \frac{\text{Summe}(Q_i \cdot T_i)}{\text{Summe}(Q_i)}$$

Formel 2

**Beispiel:** Einem Kanalisationsstrang mit  $Q = 100$  l/s und  $T = 13$  °C wird eine Wärmemenge  $W_A$  von 300 kW entnommen. Dadurch kühlt sich der Teilstrang um 0,7 K auf 12,3 °C ab (Formel 1). Vor der KA fliesst der Teilstrang mit dem Hauptsammelkanal mit  $Q = 300$  l/s und  $T = 14$  °C zusammen. Nach Formel 2 ergibt sich ohne Wärmeentnahme im Teilstrang eine resultierende Abwassertemperatur im KA-Zulauf von 13,8 °C. Bei Wärmeentnahme im Teilstrang ergibt sich eine resultierende Abwassertemperatur im KA-Zulauf von 13,6 °C. Das heisst, der KA-Zulauf wird durch die Wärmeentnahme im Teilstrang um nur 0,2 K abgekühlt.

Das Beispiel zeigt, dass durch den Zusammenfluss verschiedener Teilströme vor einer KA die Temperaturabnahme in einem vorherliegenden Kanalisationsabschnitt, dem Wärme entzogen wurde, wieder kompensiert werden kann. Je grösser die zufließenden Teilströme sind, desto mehr wird die Abkühlung eines Teilstranges kompensiert.

<sup>1</sup> Wanner O., Delavy P., Eugster J., Panagiotidis V., Siegrist H. (EAWAG, CH-8600 Dübendorf, 2004): Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen, BFE-Projekt Nr. 44177, Schlussbericht. (Internet: [www.waermepumpe.ch](http://www.waermepumpe.ch) - Forschung/Entwicklung - Berichte - Wärmequellen - Abwasser)

## Auswirkung der Wärmeentnahme auf den Betrieb einer Kläranlage

Die für die Reinigungsleistung relevanten und von Temperatureinflüssen am stärksten betroffenen Prozesse in einer KA sind die Nitrifikation (mikrobiologische aerobe Oxidation von Ammonium  $\text{NH}_4$  zu Nitrat  $\text{NO}_3$ ) und die Denitrifikation (mikrobiologische anoxische Reduktion von Nitrat  $\text{NO}_3$  zum Zwischenprodukt Nitrit  $\text{NO}_2$  und schliesslich zu Luftstickstoff  $\text{N}_2$ ). Grundsätzlich nimmt der Wirkungsgrad der Stickstoffelimination bei einer Abkühlung des Abwassers aufgrund der Verminderung der Wachstumsgeschwindigkeit der Mikroorganismen (Nitrifikanten/Denitrifikanten) ab. Mit theoretischen Modellen und Messungen auf der KA Werdhölzli in Zürich wurde untersucht, wie sich eine Temperaturabnahme im KA-Zulauf auf diese Prozesse auswirkt.

Die Resultate dieser statischen Modellrechnungen werden in einem Nomogramm (Abb. 9) dargestellt. Mit dem Nomogramm können die Auswirkungen einer Wärmeentnahme vor dem Zulauf auf die biologische Stufe der Kläranlage auf der Basis von Tagesmittelwerten abgeschätzt werden. Insbesondere können folgende Effekte der Abwasserabkühlung beurteilt werden:

1. Verminderung der Nitrifikationssicherheit (SF) bei gleich bleibendem aerobem Schlammalter (gleiche Beckenvolumen) → Erhöhung der  $\text{NH}_4$ -Konzentration im Ablauf während einer Spitzenfracht (Diagramm 1)
2. Vergrößerung des Belebtschlammbeckens bzw. des totalen Schlammalters bei gleich bleibender Nitrifikationssicherheit und Denitrifikationsleistung → keine Leistungsverminderung der Kläranlage (Diagramm 2)
3. Vergrößerung des Nitrifikationsvolumens auf Kosten des Denitrifikationsvolumens → gleiche Nitrifikationssicherheit = gleiche  $\text{NH}_4$ -Ablaufwerte, aber verminderte Denitrifikationsleistung, d.h. geringere totale Stickstoffelimination (Diagramm 3)

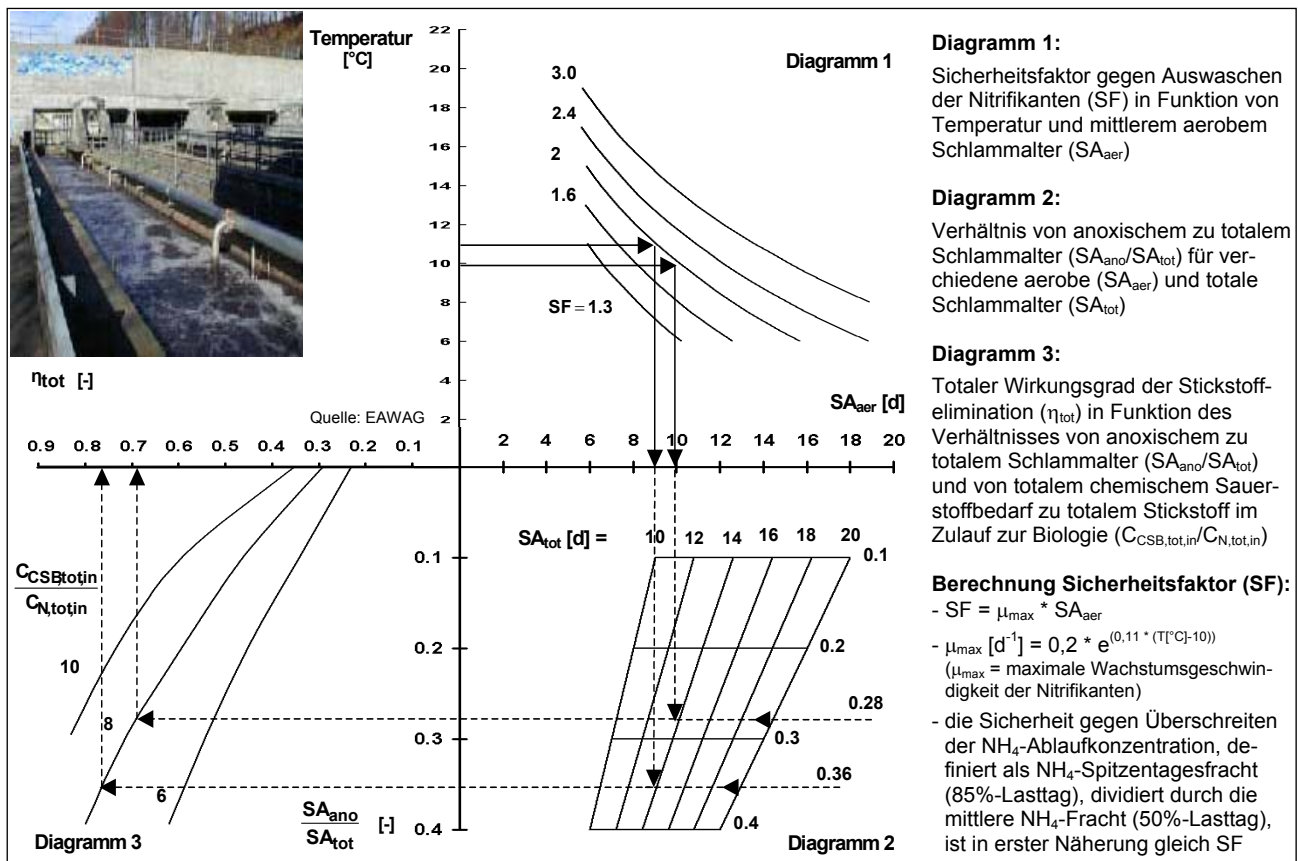


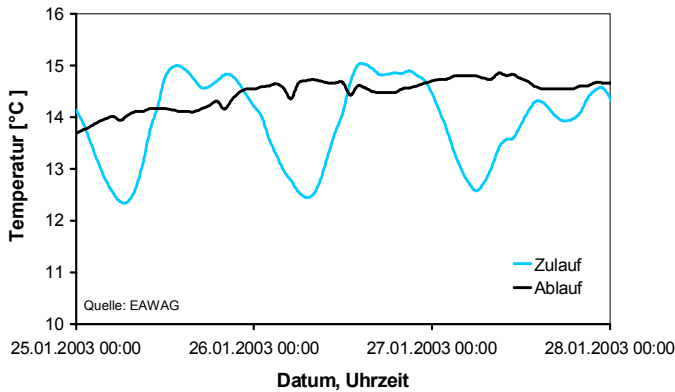
Abb. 9: Nomogramm zur Abschätzung des Einflusses einer Temperaturabsenkung des Abwassers im KA-Zulauf auf die Nitrifikationssicherheit bzw. die Verminderung der Stickstoffelimination (Erläuterung des Anwendungsbeispiels siehe unten)

### Anwendungsbeispiel Nomogramm (Abb. 9):

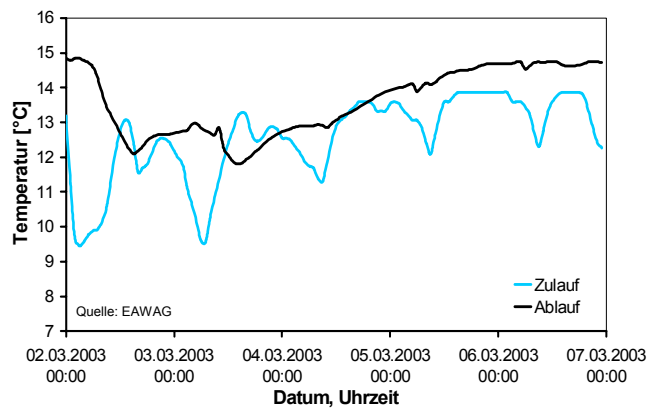
Einfluss der Temperaturabsenkung um 1 K in der Biologie (Belebungsbecken mit aerober Nitrifikations- und anoxischer Denitrifikationszone,  $\text{SA}_{\text{tot}} = 14$  Tage, Verhältnis  $C_{\text{CSB,tot,in}}/C_{\text{N,tot,in}} = 8$ , 30'000 EW) mit einer Temperatur von 11 °C und einem aeroben Schlammalter  $\text{SA}_{\text{aer}}$  von 9 Tagen (Sicherheitsfaktor SF = 2). Bei gleich bleibendem  $\text{SA}_{\text{aer}}$  vermindert sich SF auf 1,8, was für die betrachtete Anlage noch nicht problematisch sein dürfte. Bei Erhöhung von  $\text{SA}_{\text{aer}}$  auf 10 Tage bleibt SF gleich (Diagramm 1). Die Erhöhung von  $\text{SA}_{\text{aer}}$  kann erreicht werden durch eine Vergrößerung des aeroben Volumens des Belebungsbeckens. Für das Beispiel bedeutet dies eine Reduktion des Denitrifikationsvolumens und damit von  $\text{SA}_{\text{ano}}/\text{SA}_{\text{tot}}$  von 0,36 auf 0,28 (Diagramm 2). Dadurch wird die Denitrifikationsleistung vermindert, was den totalen Wirkungsgrad der Stickstoffelimination  $\eta_{\text{tot}}$  von 0,77 auf 0,69 reduziert. Wichtig ist aber, dass trotz der Temperaturabsenkung um 1 K die Sicherheit für die Einhaltung des  $\text{NH}_4$ -Ablaufgrenzwertes gleich bleibt.

## Temperaturausgleich in der Kläranlage

Kurzfristige Tagesschwankungen der Zulauftemperaturen bei Trockenwetter von 2 bis 3 K werden in einer Kläranlage auf eine Schwankung von nur noch ca. 0,5 K gedämpft. Zudem wird dem Abwasser in der Kläranlage durch die ablaufenden biologischen Prozesse Wärme zugeführt, was zu durchschnittlich 0,5 °C wärmeren Ablauftemperaturen im Vergleich zu den Zulauftemperaturen führt (Abb. 10a). Auch bei einem der stärksten Temperatureinbrüche bei Regenwetter im Winter 2002/2003 ist diese Dämpfung klar ersichtlich (Abb. 10b).



**Abb. 10a:** Zu- und Ablauftemperatur Kläranlage Werdhölzli (Zürich) bei Trockenwetter im Winter



**Abb. 10b:** Zu- und Ablauftemperatur Kläranlage Werdhölzli (Zürich) bei Regenwetter im Winter

### Schlussfolgerungen zum Einfluss der Wärmeentnahme aus der Kanalisation auf den KA-Betrieb

- Die zu beachtenden Einflussgrössen auf die Temperatur im Abwasser der Kanalisation sind: die durch den Wärmetauscher entnommene Wärmemenge, die Durchflussmenge und die Gegebenheiten beim Zusammenfluss verschiedener Teilströme. Die Temperaturabnahme durch Wärmeentnahme liegt im Normalfall in der gleichen Grössenordnung wie die natürlichen Wärmeverluste in der Kanalisation.
- Die Temperatur in der biologischen Stufe einer Kläranlage entspricht ungefähr der Temperatur im KA-Ablauf. Der Temperaturausgleich in der Kläranlage bedeutet also, dass kurzzeitige Temperatureinbrüche und Tag-Nacht-Schwankungen auf die Nitrifikation und die  $\text{NH}_4$ -Konzentration im Ablauf keinen relevanten Einfluss haben. Wenn aber die Zulauftemperatur während längerer Zeit abgesenkt wird (lange Regenereignisse oder Wärmeentnahme), stellt sich auch in der Biologie eine tiefere Temperatur ein. Da eine Temperaturabnahme in der Biologie generell die Nitrifikationsleistung vermindert (wodurch die  $\text{NH}_4$ -Konzentration im Ablauf ansteigt), muss dies bei der Wärmeentnahme aus der Kanalisation berücksichtigt werden. Wird die Temperatur in der Kläranlage unter 10 °C und/oder um mehr als 0,5 K abgekühlt, so muss von Abwasserfachleuten eine detaillierte Prüfung unter Berücksichtigung der Dimensionierungstemperatur (in Deutschland 10°C gemäss ATV-Arbeitsblatt A131) vorgenommen werden (s. Kapitel 6 des vorliegenden Leitfadens).
- Die Auswirkungen einer Temperaturabsenkung im Zulauf zu einer Kläranlage (z.B. durch Wärmeentnahme) sind umso unbedenklicher, je grösser die Dimensionierungsreserve der Kläranlage ist. Bei einer grosszügig dimensionierten mittleren Kläranlage ist eine Temperaturabnahme von bis zu 1 K im Zulauf im Normalfall kein Problem. Da die Rahmenbedingungen aber auf jeder Kläranlage sehr unterschiedlich sind (Abwasserzusammensetzung, Betriebsweise, Beckengrössen, mögliche Schlammalter, Einleitungsbedingungen, etc.) muss jede Anlage separat betrachtet werden.
- Die Grenzfälle für die Einhaltung der Ammonium ( $\text{NH}_4$ ) - und Nitrit ( $\text{NO}_2$ ) - Ablaufgrenzwerte treten im Allgemeinen in den Wintermonaten auf, wenn sich die Zulauftemperaturen im Bereich der Dimensionierungstemperatur für die Kläranlage bewegen (vor allem in diesem Zeitraum wird aber die Wärme zu Heizzwecken gebraucht). Im Frühling, Sommer und Herbst sind die Abwassertemperaturen durchschnittlich zwischen 12 °C und 20 °C, und damit für die meisten Kläranlagen unproblematisch für eine Wärmeentnahme.

## 5 Grenzkriterien für die Sicherstellung des Kläranlagen-Betriebes

Die Abwasserwärmenutzung ist aus ökologischen und wirtschaftlichen Gründen grundsätzlich förderungswürdig. Um dabei aber den Betrieb und die Reinigungskapazität der Kläranlage sicherstellen zu können und dem Gewässerschutz Rechnung zu tragen, wurden in der Schweiz die nachfolgenden Empfehlungen ausgearbeitet. Grundsätzlich darf die Wärmeentnahme aus der Kanalisation vor einer Kläranlage die Reinigungsleistung der betreffenden Kläranlage nicht massgebend verringern oder gar einen Ausbau nötig machen. Ferner darf die Temperatur des Gewässers, in welches das Abwasser eingeleitet wird (Vorfluter), durch die Wärmenutzung nicht nachteilig verändert werden, so dass die Lebens- und Fortpflanzungsbedingungen für die Wasserorganismen sowie die natürliche Selbstreinigung gewährleistet bleiben.

### 1. Allgemeingültige Grenzkriterien für die Wärmenutzung aus ungereinigtem Abwasser in der Kanalisation vor der KA:

- 1.1 Falls die durch eine Wärmeentnahme aus einem Kanalisations-Teilstrang resultierende **Temperatur im KA-Zulauf im Durchschnitt der Wintermonate Dezember, Januar und Februar 10 °C nicht unterschreitet** und die resultierende **Abkühlung im KA-Zulauf  $\leq 0,5$  K** ist (entspricht dem langjährigen periodenbezogenen Schwankungsbereich), ist die Wärmeentnahme ohne detaillierte Untersuchungen zulässig.
- 1.2 Falls die durch eine Wärmeentnahme aus einem Kanalisations-Teilstrang resultierende **Temperatur im KA-Zulauf im Durchschnitt der Wintermonate Dezember, Januar und Februar 10 °C unterschreitet** und/oder die resultierende **Abkühlung im KA-Zulauf  $> 0,5$  K** ist, muss eine **detaillierte Überprüfung des Einflusses auf den KA-Betrieb** unter Berücksichtigung der Dimensionierungstemperatur erfolgen (Beschreibung des Vorgehens in Kapitel 8 des vorliegenden Leitfadens). Anhand der Überprüfung kann entschieden werden, ob die KA-Reinigungsleistung durch die geplante Wärmeentnahme nicht beeinträchtigt wird \* und entsprechend die Wärmeentnahme zulässig ist.
- 1.3 Bei der Überprüfung sind bestehende und geplante Wärmeentnahmen im gleichen Kanalisationsnetz vor der KA zu berücksichtigen (Kumulierung der Abkühlungen bis zum KA-Zulauf). Dabei gilt für die Wärmenutzer das Prinzip „first come - first serve“.

\*) die Anforderungen an die Einleitbedingungen in den Vorfluter (insbesondere Ammonium (NH<sub>4</sub>)- und Nitrit (NO<sub>2</sub>)-Konzentration) müssen erfüllt werden können.

### 2. Allgemeingültige Grenzkriterien für die Wärmenutzung aus gereinigtem Abwasser nach der KA bzw. vor dem Vorfluter:

- 2.1 Die Temperatur in Fliessgewässern darf sich durch Wärmenutzung gemäss Gewässerschutzverordnung nicht um mehr als 1,5 K verändern. Sinngemäss gilt für den Vorfluter: Die **Temperatur im Vorfluter der KA** darf sich durch eine Wärmeentnahme aus dem KA-Ablauf **nicht um mehr als 1,5 K ändern**.
- 2.2 Die **KA-Ablauf-Temperatur** soll nach der Wärmeentnahme **bei der Einleitungsstelle in den Vorfluter 3 °C nicht unterschreiten** (dadurch können lokale Beeinträchtigungen der Flora und Fauna ausgeschlossen werden).
- 2.3 Schnelle Temperaturveränderungen im Gewässer sind zu vermeiden (entsprechende Auswirkungen auf den Vorfluter der KA  $\leq 1,5$  K). \*\*
- 2.4 Bei offenen Systemen (Einleitung in ein anderes Gewässer) müssen Restwasserbestimmungen für einen Vorfluter durch die entnommene Abwassermenge beachtet werden.

\*\*) Schnelle Temperaturveränderungen sind angesichts der Systemträgeit bei der Abwasserwärmenutzung nicht zu erwarten.

Die Schweizer Grenzkriterien können grundsätzlich auch in Deutschland angewendet werden, da in der Schweiz wie in Deutschland dieselben Dimensionierungsgrundlagen für Kläranlagen verwendet werden (DWA, früher ATV). Bei korrekt dimensionierten und betriebenen Kläranlagen ergeben sich normalerweise keine Probleme betreffend Reinigungsleistung der Kläranlagen, falls die Dimensionierungstemperatur durch die Wärmeentnahme nicht unterschritten wird.

Da die Temperaturabsenkung durch Wärmeentnahme im Normalfall in der gleichen Grössenordnung liegt, wie die natürlichen Wärmeverluste in der Kanalisation, ist nicht damit zu rechnen, dass die Temperaturabnahme Auswirkungen auf die Kanalisation selbst hat.

## 6 Hilfsmittel zur Überprüfung der Einhaltung der Grenzkriterien

Mit den folgenden einfachen Berechnungshilfen kann überprüft werden, ob der Kläranlagen-Betrieb bei der Auslegung eines bestimmten Wärmetauschers mit zugehöriger Wärmepumpe im Einzugsgebiet der Kläranlage sichergestellt ist, insbesondere ob die Ammonium-Einleitbedingungen gemäss Abwasserverordnung (AbwV) von 10 mg/l Ammonium-Stickstoff  $\text{NH}_4\text{-N}$  (Kläranlagen > 5'000 EWG) eingehalten werden können.

### 1. Schritt: Abschätzung der Abwassertemperatur im KA-Zulauf

Zunächst kann mit einer einfachen Berechnung unter Verwendung der Formeln 1 und 2 (Kapitel 4) abgeschätzt werden, wie sich die Wärmeentnahme mittels Wärmetauscher aus einem Kanalisationsabschnitt und die nachträglichen Zuflüsse von weiteren Teilströmen auf die Temperatur im Zulauf zur Kläranlage auswirken.

Zur Veranschaulichung dienen die folgenden zwei Beispiele für eine mittelgrosse Kläranlage, bei denen die resultierende Temperatur im Zulauf zur Kläranlage für zwei unterschiedliche Wärmeentnahmen aus dem gleichen Teilstrom im Kanalisationsnetz vor der Kläranlage berechnet wird (Abb. 11a und Abb. 11b).

Abnahme der Abwassertemperatur ( $T_A$ ) in Teilstrom durch Wärmeentnahme mittels Wärmetauscher (mit WT-Leistung $W_A$ )					
	$T_{\text{vor WT}}$ [°C]	Q [l/s]	$W_A$ [kW]	$\Delta T$ [K]	$T_{\text{nach WT}}$ [°C]
Teilstrom	12,00	50	100	-0,48	11,52
Abnahme der Abwassertemperatur ( $T_A$ ) im KA-Zulauf durch Wärmeentnahme aus Teilstrom					
	T [°C]	Q [l/s]	Eingabe		Resultate
Gesamter KA-Zulauf ohne Wärmeentnahme	11,00	200			
Teilstrom ohne Wärmeentnahme	12,00	50			
KA-Zulauf ohne Teilstrom	10,67	150			
Teilstrom mit Wärmeentnahme	11,52	50	$\Delta T$ im KA-Zulauf		
Gesamter KA-Zulauf mit Wärmeentnahme aus Teilstrom	10,88	200	-0,12 K		

Abb. 11a: geringe Wärmeentnahme bei KA mit ca. 50'000 EW

Abnahme der Abwassertemperatur ( $T_A$ ) in Teilstrom durch Wärmeentnahme mittels Wärmetauscher (mit WT-Leistung $W_A$ )					
	$T_{\text{vor WT}}$ [°C]	Q [l/s]	$W_A$ [kW]	$\Delta T$ [K]	$T_{\text{nach WT}}$ [°C]
Teilstrom	12,00	50	300	-1,43	10,57
Abnahme der Abwassertemperatur ( $T_A$ ) im KA-Zulauf durch Wärmeentnahme aus Teilstrom					
	T [°C]	Q [l/s]	Eingabe		Resultate
Gesamter KA-Zulauf ohne Wärmeentnahme	11,00	200			
Teilstrom ohne Wärmeentnahme	12,00	50			
KA-Zulauf ohne Teilstrom	10,67	150			
Teilstrom mit Wärmeentnahme	10,57	50	$\Delta T$ im KA-Zulauf		
Gesamter KA-Zulauf mit Wärmeentnahme aus Teilstrom	10,64	200	-0,36 K		

Abb. 11b: grosse Wärmeentnahme bei KA mit ca. 50'000 EW

Abb. 11c zeigt ein Beispiel für eine grosse Kläranlage mit mehreren Wärmeentnahmen aus verschiedenen Teilströmen des Kanalisationsnetzes, deren Auswirkungen sich bis zum Zulauf zur Kläranlage kumulieren. Hier ist ersichtlich, dass sich auch mehrere, z.T. grosse, Wärmeentnahmen auf die Temperatur im Zulauf zur Kläranlage nicht unbedingt massgeblich auswirken müssen.

	Temperatur ohne Wärmeentnahme $T$ [°C]	Abflussmenge Q [l/s]	Leistung Wärmetauscher $W_A$ [kW]	Temperaturabnahme $\Delta T$ [K]	Temperatur mit Wärmeentnahme $T$ [°C]
Teilstrom mit Wärmeentnahme 1	12,00	50	300	1,43	10,57
Teilstrom mit Wärmeentnahme 2	13,00	25	150	1,43	11,57
Teilstrom mit Wärmeentnahme 3	11,00	40	100	0,60	10,40
Teilstrom mit Wärmeentnahme 4	10,00	80	150	0,45	9,55
Teilströme ohne Wärmeentnahme (Differenz zu Zulauf KA gesamt)	12,43	405			
<b>Zulauf KA gesamt</b>	12,00	600	700	0,28	11,72
	Eingabe			Resultate	

Abb. 11c: mehrere Wärmeentnahmen bei KA mit ca. 150'000 EW

## 2. Schritt: Einhaltung des Ammonium (NH<sub>4</sub>) - Grenzwertes im Ablauf einer Kläranlage

Falls gemäss der Berechnung der Abwassertemperatur im Zulauf zu einer Kläranlage das allgemein gültige Grenzkriterium  $T \geq 10^\circ\text{C}$  und  $\Delta T \leq 0,5 \text{ K}$  (s. Kapitel 5, Grenzkriterium 1.1) nicht eingehalten wird, muss mit einer vertieften Untersuchung durch Abwasserfachleute geprüft werden, ob die resultierende Temperaturabsenkung im Zulauf zur Kläranlage die Reinigungsleistung der Kläranlage nicht relevant vermindert, d.h. ob der NH<sub>4</sub>-Ablaufgrenzwert eingehalten werden kann (s. Kapitel 5, Grenzkriterium 1.2). Mittels dynamischer Modellrechnungen wurde dazu an der EAWAG im Rahmen des bereits erwähnten BFE-Projektes (s. Kapitel 4) als Ergänzung zum Nomogramm (Abb. 9) ein einfaches Diagramm entwickelt, in dem der direkte Zusammenhang zwischen Sicherheitsfaktor SF und NH<sub>4</sub>-Konzentration C<sub>NH<sub>4</sub></sub> im KA-Ablauf (24h-Sammelproben) für den 50%- und den 85%-NH<sub>4</sub>-Lasttag grafisch dargestellt werden kann (Abb. 12).

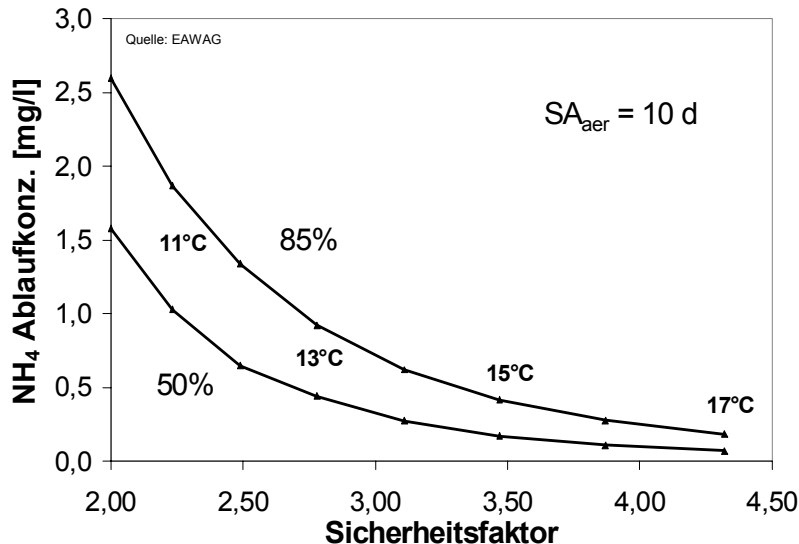


Abb. 12: NH<sub>4</sub>-Konzentration im Ablauf der Nachklärung in Abhängigkeit vom Sicherheitsfaktor SF (50%- und 85%-Lasttag)

Aus dem aeroben Schlammalter SA<sub>aer</sub> im Winter und den tiefsten Ablauftemperaturen im Kläranlagen-Betrieb kann der aktuelle Sicherheitsfaktor SF der Nitrifikation berechnet werden (siehe auch Nomogramm, Abb. 9). Der Einfluss einer Temperaturabsenkung auf die NH<sub>4</sub>-Ablaufkonzentration kann nun mit Hilfe von Abb. 12 abgeschätzt werden (Berechnung des neuen SF bei geringerer Temperatur). Im Falle einer deutlichen Überschreitung des Grenzwertes auch für den 50%-Lasttag kann umgekehrt eine maximal zulässige Temperaturabsenkung und daraus die maximal mögliche Wärmeentnahmemenge abgeleitet werden (Berechnung gemäss Beispielen in Abb. 11a, 11b, 11c).

Bei einem aeroben Schlammalter SA<sub>aer</sub> von 10 Tagen (üblicher Wert) und einer Temperatur von 10°C (Dimensionierungstemperatur nach ATV) ergibt sich ein Sicherheitsfaktor SF von 2,0 (gemäss Formel im Nomogramm, Abb. 9), d.h. eine zweifache Sicherheit gegen das Auswaschen der Mikroorganismen (Nitrifikanten). Damit wird gem. Abb. 12 der in der Abwasserverordnung (AbwV) vorgeschriebene NH<sub>4</sub>-Stickstoff-Ablaufgrenzwert für Kläranlagen mit mehr als 5'000 EW von 10 mg/l bei weitem eingehalten (der Grenzwert kann für einzelne Kläranlagen oder Kommunen niedriger festgelegt werden). Es kann zudem davon ausgegangen werden, dass der 85%-Lasttag und eine tiefe Temperatur von 10°C nur sehr selten zusammenfallen, und dass eine Grenzwertüberschreitung demnach in weniger als 5% der Tage eines Jahres vorkommt.

Basierend auf einer Summenhäufigkeitskurve von NH<sub>4</sub>-Ablaufmesswerten kann mit Hilfe der Abb. 12 die Summenhäufigkeitskurve abgeschätzt werden, die nach einer Temperaturabsenkung zu erwarten ist. Die Auswirkungen einer Temperaturabsenkung im Zulauf zu einer Kläranlage sind umso unbedenklicher, je grösser die Dimensionierungsreserve der Kläranlage ist.

### Beispiel:

Erhöht man die Wärmetauscherleistung im vorangehenden Beispiel gemäss Abb. 11b auf eine sehr grosse Leistung von W<sub>A</sub> = 500 kW, ergibt sich durch die Wärmeentnahme vor der KA eine Temperaturabsenkung im KA-Zulauf von 0,6 K (> 0,5 K), d.h. das Abwasser wird von 11 °C auf 10,4 °C abgekühlt. Die betreffende Kläranlage wird mit einem aeroben Schlammalter von 11 Tagen betrieben. Durch die Abkühlung vermindert sich also SF von  $[0,2 * e^{(0,11 * (11-10))}] * 11 = 2,5$  auf  $[0,2 * e^{(0,11 * (10,4-10))}] * 11 = 2,3$ . Auch mit der Abkühlung kann der NH<sub>4</sub>-Ablaufgrenzwert sicher in mehr als 95% der Tage eines Jahres eingehalten werden. Damit ist die Wärmeentnahme aus Sicht der Betriebssicherheit der Kläranlage zulässig.

## 7 Einfluss des Abwassers auf den Wärmetauscher

Von der EAWAG wurde im Rahmen des bereits erwähnten BFE-Projektes über die Abwasserwärmenutzung (s. Kapitel 4) auch die Biofilmbildung auf Wärmetauschern in einem Labor-Prüfstand eingehend untersucht (WT wurden mit vorgeklärtem kommunalem Abwasser überströmt). Die Resultate und Schlussfolgerungen dieser Untersuchungen werden hier zusammengefasst.

### Biofilmbildung

Die Wärmeübertragungsleistung eines Wärmetauschers wird durch Biofilmbildung auf der Wärmetauscheroberfläche vermindert. Dieser Zusammenhang kann durch den sogenannten „Fouling-Factor“  $f$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ] quantifiziert werden. Dessen Kehrwert  $1/f$  [ $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ] stellt einen zusätzlichen Widerstand für den Wärmedurchgang dar (der Wärmedurchgangskoeffizient  $k$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ] und damit die Leistung eines Wärmetauschers wird entsprechend vermindert) und ist ein Mass für die Biofilmbildung auf dem Wärmetauscher (Abb. 13).

Beispiel (Abb. 13): Bei einem mittleren Fouling-Factor ( $1/f = 0,003 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ ) vermindert sich die Wärmeübertragungsleistung um rund 50%.

**Schlussfolgerung:** Die Biofilmbildung hat einen starken Einfluss auf die Wärmeleistung eines Wärmetauschers.

Da die Bildung eines Biofilms in einer Kanalisation nicht verhindert werden kann und immer auftritt (abhängig v. a. von Abwasserzusammensetzung und hydraulischen Bedingungen), wurden mögliche Massnahmen zur Verminderung der Biofilmbildung untersucht.

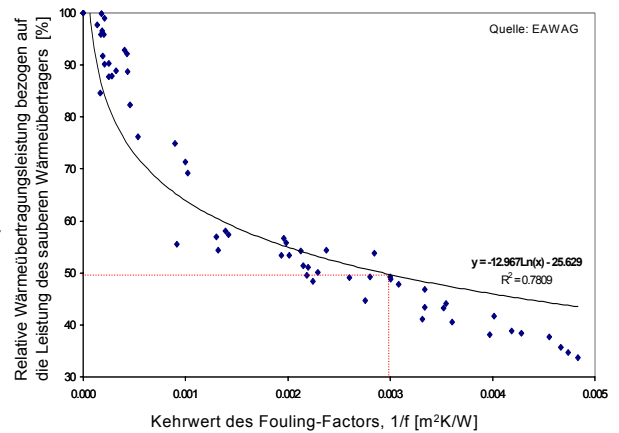


Abb. 13: Gemessene relative Wärmeübertragungsleistung in Funktion des Kehrwerts des Fouling-Factors

### Bearbeitung und Beschichtung der Wärmetauscheroberfläche

Auf dem Prüfstand wurden leicht austauschbare Testplättchen aus Stahlblech (gängiges Material heutiger Wärmetauscher) gleicher Grösse, aber mit unterschiedlicher Oberflächenbehandlung (diamantpoliert, elektroliert, kaltgewalzt, geschliffen, etc.) und unterschiedlichen Beschichtungsarten getestet. Dazu wurde der Biofilm einige Tage lang wachsen gelassen. Nach einer kurzzeitigen Erhöhung der Durchflussgeschwindigkeit (Abschwemmung des Biofilms) wurde der verbleibende Biofilm analysiert (Abb. 14).

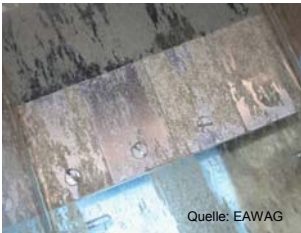


Abb. 14: montierte Testplättchen nach Abschwemmung des Biofilms

**Resultate:** Auf kaltgewalztem Stahlblech blieb am wenigsten Biofilm haften. Bei den verschiedenen Beschichtungen wurde die Bildung sehr unterschiedlicher Biofilmmarten beobachtet. Im Vergleich zum unbeschichteten kaltgewalzten Blech schnitten einige Beschichtungen (z.B. Kunststoffe) teilweise leicht, aber nicht signifikant besser ab.

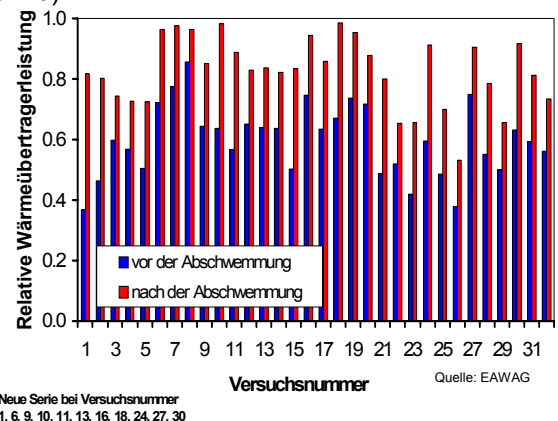
**Schlussfolgerung:** Beschichtungen können die Verschmutzung eines Wärmetauschers reduzieren. Weil aber die Leistungseinbisse des Wärmetauschers durch die Beschichtungen sowie der Abrieb der Beschichtungen durch feste Stoffe im Abwasser noch nicht untersucht wurde, können heute noch keine idealen Beschichtungsarten vorgeschlagen werden.

### Variation der Fließgeschwindigkeit und periodische Spülung

Der Effekt einer Spülung des Wärmetauschers wurde anhand aneinandergereihter Serien von Versuchen mit zwischenzeitlicher Handreinigung des Wärmetauschers (Beginn einer neuen Serie) untersucht. Dabei wurde die Wärmetauscherleistung nach einigen Tagen jeweils vor und nach der Spülung gemessen und mit der Leistung des unverschmutzten Wärmetauschers verglichen (Abb. 15).

**Resultate:** Im Schnitt ist die Wärmetauscherleistung nach der Spülung um 23 % höher als vorher. Eine Regeneration der Wärmetauscherleistung war eindeutig in allen Fällen zu beobachten, nahm jedoch mit der Zeit ab. Störungen des Strömungsfeldes auf der Wärmetauscheroberfläche (Einbauten, Stege) führen zu lokal erhöhter Turbulenz und können dadurch den Effekt einer Spülung auf die Biofilmabschwemmung noch verstärken.

**Schlussfolgerung:** Die Abschwemmung des Biofilms durch eine kurzzeitige Erhöhung der Durchflussmenge (Spülung) ist eine effektive Massnahme zur Regeneration der Leistung von verschmutzten Wärmetauschern. Die Wärmetauscherleistung wird aufgrund der Biofilmbildung im Schnitt auf 60% reduziert und durch periodische Spülung wieder auf 80% gesteigert.



Neue Serie bei Versuchsnummer

1, 6, 9, 10, 11, 13, 16, 18, 24, 27, 30

Quelle: EAWAG

Abb. 15: Relative Wärmetauscherleistung vor und nach Abschwemmung (Spülung) des Biofilms

## 8 Bedingungen für den Einbau von Wärmetauschern in Kanälen

Der Einbau von Wärmetauschern in bestehende Kanalisationen ist grundsätzlich machbar, es müssen dabei aber gewisse Bedingungen eingehalten werden. Muss der betreffende Kanalisationsabschnitt ohnehin saniert werden, ergeben sich Synergien.

Wärmetauscher können an die geometrischen Verhältnisse eines bestimmten Kanalabschnittes angepasst werden. Verschiedene mögliche Systeme von Wärmetauschern für alle in der Praxis vorkommenden Kanalprofile (Rechteck-, Kreis-, Ei-, Maulprofil) werden in Kapitel 9 beschrieben. Bei einem Kanalisations-Neubau kann der Wärmetauscher schon bei der Fertigung des Kanalrohres eingebaut werden (s. Abb. 21). Dabei werden Planung und Dimensionierung des Wärmetauschers zusammen mit der Kanalisationsplanung koordiniert.

Falls der Einbau des Wärmetauschers in eine bestehende Kanalisation nicht einfach realisierbar ist, kann ein Bypass mit integriertem Wärmetauscher parallel zur bestehenden Kanalisation erstellt werden. Dabei sind bei der Erstellung auch keine Provisorien nötig.

Damit ein Wärmetauscher in einen bestehenden Kanalisationsabschnitt eingebaut werden kann, müssen die folgenden Bedingungen erfüllt sein (die Bedingungen gelten sinngemäss auch für neu erstellte Kanalisationsabschnitte mit integrierten Wärmetauschern):

- Die erforderliche Kapazität des betreffenden Kanalisationsabschnitts darf durch den Wärmetauscher und die zugehörigen Einbauten nicht massgeblich vermindert werden. Die maximale Durchflussmenge gemäss Auslegung der Kanalisation sowie notwendiger Reserven gemäss Entwässerungsplanung muss trotz Wärmetauscher und Einbauten abfließen können.
- Die allgemeine Funktionsfähigkeit des Abwasserkanals darf durch Einbau, Betrieb und Unterhalt der Wärmetauscher nicht massgebend beeinträchtigt werden.
- Der gesamte Kanalisationsbereich muss auch mit eingebautem Wärmetauscher unter Einhaltung der gesetzlichen Sicherheitsvorschriften weiterhin zugänglich sein. Wartung und Unterhalt des gesamten Wärmetauschers müssen an jeder Stelle möglich sein. Nötigenfalls sind geeignete Montageöffnungen einzuplanen und zu erstellen.
- Der Wärmetauscher wird entweder unter Berücksichtigung der Leistungsverminderung durch Biofilmbildung (s. Kapitel 7) grösser dimensioniert, oder muss im anderen Fall je nach Verschmutzung (abhängig von der jeweiligen Abwasserzusammensetzung und den hydraulischen Verhältnissen) periodisch gereinigt werden (je nachdem durch eine geeignete Spüleinrichtung oder durch eine spezialisierte Reinigungsfirma, s. Kapitel 10).
- Routinemässige Spül- und Reinigungsarbeiten in der Kanalisation dürfen durch den Wärmetauscher und seine Einbauten nicht verhindert werden, oder es muss ein spezieller Reinigungsvorgang für den betreffenden Kanalisationsabschnitt definiert und vereinbart werden. Auch Instandhaltungs- und Erneuerungsarbeiten in der Kanalisation müssen weiterhin möglich sein. Dabei müssen alle bestehenden Sicherheits- und Schutzvorschriften eingehalten werden.
- Die bisherige Praxis-Erfahrung zeigt, dass die obigen Bedingungen in der Regel von bestehenden Kanalisationen mit einem minimalen Innendurchmesser von 800 mm erfüllt werden können. In diesen Kanalisationen können einerseits die Wärmetauscher sicher eingebaut und gewartet werden, andererseits verfügen sie in der Regel über ein ausreichendes Wärmeangebot im Abwasser.
- Der Kanalabschnitt mit dem Wärmetauscher sollte möglichst gerade sein und keine Kurven aufweisen (möglichst einfache Fabrikations- und Montagebedingungen für den Wärmetauscher). Damit sind gerade Kanalabschnitte von 20 bis 150 m Länge nötig, je nach Grösse der Anlage.
- Während der Einbauzeit eines Wärmetauschers muss die Möglichkeit bestehen, das anfallende Abwasser abzuleiten. Deshalb müssen geeignete Provisorien möglich sein (s. Kapitel 10).

Die obenerwähnten Bedingungen müssen in einer Vereinbarung oder einem Vertrag zwischen dem Betreiber der Abwasserwärmenutzungsanlage und dem Betreiber der Kanalisation geregelt werden (s. Kapitel 11).



## 9 Wärmetauscher-Systeme

Ein zentrales Element einer Abwasserwärmenutzungsanlage ist der Wärmetauscher (WT) im Kanal. Er ist das Verbindungsglied zwischen der Wärmequelle Abwasser und der Wärmepumpe, die die Abwasserwärme schliesslich in Heizwärme umwandelt (s. Kapitel 1).

Die Wärmeübertragungsleistung  $W_A$  [kW] des Wärmetauschers ist abhängig von der wirksamen WT-Oberfläche  $A_{WT}$  [m<sup>2</sup>], der mittleren Temperaturdifferenz  $\Delta T$  [K] zwischen WT-Medium (Sekundärkreislauf) und Abwasser sowie dem Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$  [W/m<sup>2</sup>K] des WT (Formel 3).

$$W_A = k \cdot A_{WT} \cdot \Delta T$$

Formel 3

Der Wärmedurchgangskoeffizient  $k$  ist ein Mass für die Wärmeleitfähigkeit eines WT und ist vom WT-Typ und den Strömungsverhältnissen der am Wärmeaustausch beteiligten Medien (Abwasser und Sekundärkreislauf) abhängig. Die systemspezifischen, mittleren Werte für  $k$  sind von den WT-Herstellern anzugeben. Sie basieren auf Literaturwerten oder Erfahrungswerten (genaue Werte können nur durch Messungen an realen Anlagen ermittelt werden). Die theoretischen  $k$ -Werte von WT mit Edelstahl-Oberflächen betragen je nach System ca. 0,6-0,9 kW/m<sup>2</sup>K. Gute Werte erreichen Systeme, in denen das WT-Medium im Gegenstrom zum Abwasser zirkuliert.

Bei der Auslegung von WT (s.a. Kapitel 13) ergibt sich bei vorgegebener WT-Leistung  $W_A$  die benötigte WT-Oberfläche aufgrund der möglichen Temperaturdifferenz. Durch Biofilmbildung auf der WT-Oberfläche kann der  $k$ -Wert und damit die WT-Leistung stark reduziert werden (s. Kapitel 7), was bei der Auslegung des WT berücksichtigt werden muss. Bei mittleren praktikablen  $\Delta T$  von 3-4 K und unter Berücksichtigung der Verschmutzung ergeben sich spezifische WT-Leistungen von 2-4 kW/m<sup>2</sup> WT-Oberfläche. (3-4 kW/m<sup>2</sup> bei geringer Verschmutzungsgefahr od. vorgesehener periodischer Reinigung; 2-3 kW/m<sup>2</sup> ohne Reinigung).

Die heute im Abwasser eingesetzten WT-Systeme bestehen aus rostfreiem Chromnickel-Stahl und verfügen über glatte Oberflächen (Verhinderung von Ablagerungen). Sie sind meist kompakt und modular aufgebaut, so dass je nach Wärmebedarf einzelne Module hinzugefügt werden können und die Module einfach in die Kanalisation eingebracht werden können. Vor- und Rücklaufleitungen bestehen meist aus PE und werden im Kanaldeckenbereich eingebaut (die Einbauten dürfen die Kapazität des Kanals nicht relevant vermindern). Möglichst kurze Vor- und Rücklaufleitungen sind von Vorteil, um Kosten und Druckverlust im Wärmeübertragungskreislauf zu minimieren. Eine gleichmässige Durchströmung der einzelnen WT-Elemente kann mit dem Tichelmann-System (Abb. 16) erreicht werden, wenn der Druckverlust im WT hoch genug ist. Als Faustregel gilt, dass 90% des Druckverlustes im System Vor-/Rücklaufleitungen und WT (ohne Verdampfer der Wärmepumpe) im WT selbst anfallen sollte. Es können entsprechend mehrere WT-Elemente in Reihe geschaltet werden, bis diese Bedingung erfüllt ist.

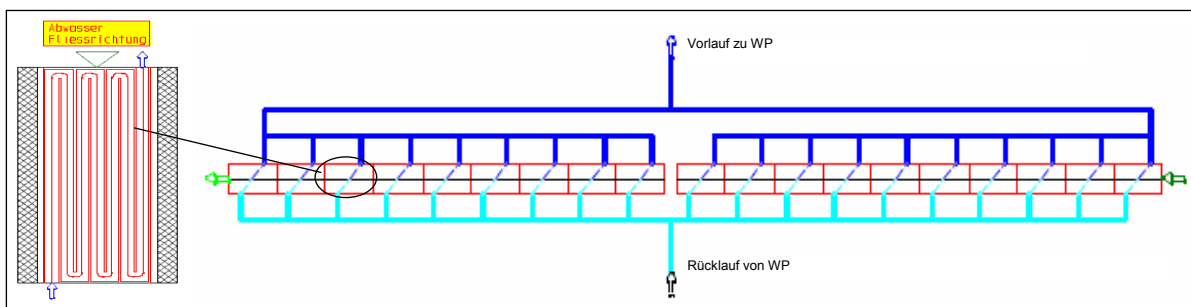


Abb. 16: verzweigtes Tichelmann-Vor-/Rücklaufsystem für die gleichmässige Durchströmung des Wärmetauschers

Beim Einsatz von gereinigtem Abwasser als Wärmequelle kommen herkömmliche, auch in der Industrie oft verwendete kompakte Lamellen- oder Plattenwärmetauscher aus Edelstahl in Frage. Bei der im vorliegenden Leitfaden beschriebenen Anlage in Muri (s. Kapitel 3) wird ein solcher WT eingesetzt.

Über die Lebensdauer von Kanal-WT liegen an einem konkreten Fall Langzeiterfahrungen vor: Der WT in Basel-Bachgraben (s. Kapitel 3) arbeitet seit 23 Jahren störungsfrei und dürfte weitere 20-30 Jahre problemlos funktionieren. Bei gutem Unterhalt (regelmässige Kontrolle und Reinigung, notwendige Reparaturen kleiner Schäden) kann deshalb für WT mit einer mittleren Lebensdauer von 30-50 Jahren gerechnet werden. Bei den zugehörigen Wärmepumpen kann gemäss neusten Erkenntnissen eine Lebensdauer von 20 Jahren angenommen werden <sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Quelle: Rognon F., et al. (Juni 2004): FAWA - Feldanalyse von Wärmepumpen-Anlagen. Tagungsunterlagen der 11. Tagung des Forschungsprogramms Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung und Kälte des Bundesamtes für Energie (BFE), CH-3003 Bern. (Internet: [www.waermepumpe.ch](http://www.waermepumpe.ch) - Veranstaltungen)

Es gibt heute auf dem Markt geeignete WT-Systeme für alle Kanalformen (Rechtecks-, Kreis- oder Oval-Profile). Die folgenden Abb. 17-21 zeigen eine Auswahl an Beispielen.



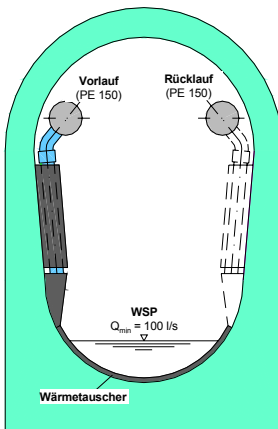
**Abb. 17: Rinnenwärmetauscher für Kanäle mit Rechteckprofil**

Vor- und Rücklaufleitungen werden ausserhalb des Kanals geführt. Anschlüsse werden für die Verbesserung der Hydraulik mit Verschalungen ausgekleidet. **Vorteile:** Der WT ist auch bei geringen Abflussmengen komplett überströmt, kein Querschnittsverlust. (eingesetzt in Zwingen, s. Kapitel 3)



**Abb. 18: Rinnenwärmetauscher für Kanäle mit Kreisprofil**

Der WT wird als Trockenwetterrinne inkl. Vor- und Rücklaufleitungen eingegossen. Einsetzbar ab Kanaldurchmessern von 1 m. **Vorteil:** Hydraulisch günstig. **Nachteil:** Relativ grosser Querschnittsverlust. (eingesetzt in Zürich-Wipkingen, s. Kapitel 3)



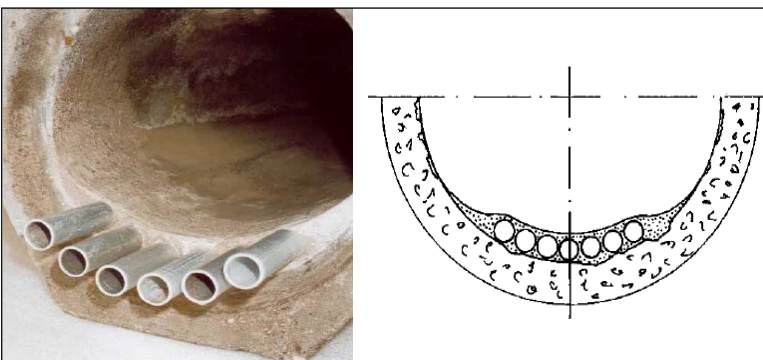
**Abb. 19: Rinnenwärmetauscher für Kanäle mit Ovalprofil**

Vor- und Rücklaufleitungen inkl. Anschlüsse werden im Deckenbereich des Kanals montiert (mit Abweisblechen für die Verbesserung der hydraulischen Verhältnisse). **Vorteil:** Nur geringer Querschnittsverlust. (eingesetzt in Binningen, s. Kapitel 3)



**Abb. 21: Rinnenwärmetauscher als vorgefertigte Kanalisationselemente**

Der WT inkl. Vor- und Rücklaufleitungen mit Anschlüssen werden im Werk ins Rohr integriert. **Vorteile:** Keinerlei Abflussbehinderung, dimensionierter Rohrquerschnitt, bei vollgefüllten Rohren (z.B. Abzweigung eines Teil-Abwasserstroms) ist es mit diesem System auch möglich, den Wärmetauscher über den ganzen inneren Rohrumfang auszuführen. **Nachteil:** Einsetzbar nur bei Kanalisations-Neubauten. (eingesetzt in Leverkusen D und Winterthur-Wülflingen CH)



**Abb. 20: Rohrwärmetauscher**

Der WT besteht aus Chromstahlrohren, die mit Spezialmörtel direkt in die Kanalsole vergossen werden. **Vorteil:** Nur kleiner Querschnittsverlust. **Nachteil:** Zusätzlicher Wärmedurchgangswiderstand durch Mörtel, das Abwasser ist nicht direkt mit dem WT in Berührung, was einen schlechteren Wärmedurchgang zur Folge hat (noch keine Praxiserfahrungen).

## 10 Praxistipps für Einbau, Betrieb, Wartung und Unterhalt von Wärmetauschern

### Einbau/Provisorien

Beim Einbau eines WT in eine bestehende Kanalisation muss vorab sichergestellt werden, dass das anfallende Abwasser auch während der Bauphase abfließen kann: es sind geeignete Provisorien oder Umleitungen zu erstellen. Da die Einbauzeit für den Wärmetauscher nur 1-10 Tage dauert (je nach Grösse), sind möglichst einfache, an die örtlichen Gegebenheiten angepasste Lösungen anzustreben. Bei kleinen Kanälen mit geringem Abfluss können Pumpleitungen eingesetzt werden, bei breiten Kanälen mit grossen Abflussmengen kann der Kanal mit einer abgedichteten Trennwand aufgeteilt werden (auf einer Seite kann der Wärmetauscher montiert werden, während auf der anderen Seite das Abwasser ungehindert abfließen kann).

### Zugänglichkeit und Sicherheit

Sowohl für den Einbau als auch für Wartungs- und Unterhaltsarbeiten während des Betriebes muss für eine einfache und sichere Zugänglichkeit zu Wärmetauscher sowie Vor- und Rücklaufleitungen gesorgt werden. Bei Neubauten sollten spezielle Montageöffnungen vorgesehen werden. Auch beim Einbau in bestehende Kanäle sollten gegebenenfalls spezielle Montageöffnungen erstellt werden. Während der Einbauzeit des Wärmetauschers muss zusätzlich auf die Sicherheit der Arbeiter geachtet werden (Warnung bei steigender Abwassermenge).

### Sanierung von Kanalabschnitten

Der Einbau eines Wärmetauschers lässt sich gut kombinieren mit der Sanierung eines Kanalabschnittes. Mit dem Wärmetauschereinbau geht die Ausbesserung der Kanalsole einher. Muss ein Kanalabschnitt so oder so im Rahmen des Kanalisationsunterhaltes erneuert oder saniert werden, kann der Wärmetauschereinbau im Rahmen dieser Kanalsanierung kostengünstig erfolgen (Kostenteilung zwischen Kanalbetreiber und Wärmenutzer).

### Reinigung

In Kapitel 7 wird der positive Effekt der Spülung oder Reinigung eines Wärmetauschers auf dessen Leistung beschrieben. Eine kontinuierliche Spülvorrichtung vor dem Kanalisationsabschnitt mit dem Wärmetauscher kann die Verschmutzung des Wärmetauschers verringern und damit die Wärmeübertragungsleistung des Wärmetauschers verbessern. Dafür gibt es auf dem Markt geeignete Systeme sowohl für kleine als auch für grössere Kanäle. Dabei wird die Technik der Schwallspülung mit Abwasser (ohne Fremdenergiebedarf) angewendet (Abb. 22 und 23). Es kann auch automatisiert mit Trink- oder Brauchwasser gespült werden oder eine periodische Reinigung durch eine spezialisierte Kanalreinigungsfirma durchgeführt werden (heute meist praktizierte Lösung, wo eine Reinigung nötig ist). Alternativ zur periodischen Reinigung kann die Verschmutzung des Wärmetauschers in Kauf genommen und auf eine Reinigung verzichtet werden. Dabei muss der Wärmetauscher mit entsprechenden Sicherheiten grösser ausgelegt werden. Schlussendlich hilft ein Kostenvergleich, die optimale Lösung zu finden.



Abb. 22: automatische Schwallspülung für kleine Kanäle



Abb. 23: automatische Schwallspülung für grosse Kanäle

## 11 Absprache zwischen Betreibern von Abwasserwärmenutzungsanlagen und Betreibern von Kanalisationen und/oder Kläranlagen

Eine frühzeitige Absprache des Betreibers der Abwasserwärmenutzungsanlage mit den zuständigen Betreibern von Kläranlage und Kanalisation ist bei allen Projektphasen (Planung, Bau, Betrieb, Unterhalt, Wartung und Erneuerung) von zentraler Bedeutung für den Erfolg eines Abwasserwärmenutzungs-Projektes.

Zwischen einem Kläranlagen- bzw. Kanalisationsbetreiber und einem Abwasserwärmenutzer (öffentlicher oder privater Bauherr bzw. Contractor) sollten die folgenden Punkte vertraglich geregelt werden:

- Die erforderliche Abflusskapazität (gemäss Grundlagen wie Entwässerungsplanung, Ausbauprojekte) des betreffenden Kanalisationsabschnitts muss auch bei eingebautem Wärmetauscher gewährleistet sein.
- Festlegung der maximalen Wärmetauscherleistung, d. h. der maximal zu entziehenden Wärmemenge aus dem Abwasser des betreffenden Kanalisationsabschnitts. Der begrenzende Faktor dabei ist die maximal zulässige Abkühlung des Abwassers im KA-Zulauf (vgl. Kapitel 5, 6).
- Die allgemeine Funktionsfähigkeit der Kanalisation darf durch Einbau, Betrieb und Unterhalt der Wärmenutzungsanlage, insbesondere des Wärmetauschers, nicht beeinträchtigt werden.
- Definition der Zuständigkeiten und Abläufe für Einbau, Kontrolle, Wartung und gegebenenfalls periodische Reinigung.
- Pflichtenheft für Wartungsarbeiten (Festlegung von Wartungsöffnungen, zu reinigenden Objekten, Hilfsmitteln, etc.).
- Sicherheits- und Schutzmassnahmen
- Besitzverhältnisse, Entschädigungen, Gebühren und Schadens- bzw. Haftungsregelungen
- Qualitätssicherung (periodische Überprüfung der Leistungserbringung der Gesamtanlage, insbesondere des Wärmetauschers)
- Ausserbetriebnahme der Wärmenutzungsanlage (Rückbau)

## 12 Contracting, Entschädigungen, Besitzverhältnisse, Schadens- und Haftungsregelungen

### Contracting

In den meisten Fällen (bisherige Praxis) werden Abwasserwärmenutzungsanlagen im sogenannten Contracting realisiert. Dabei werden Planung, Finanzierung, Erstellung, Betrieb und Unterhalt sowie Administration (Heizkostenabrechnung etc.) komplett vom Contractor (häufig ein Energieversorgungsunternehmen) übernommen.

Contracting bedeutet Heizen ohne Kostenrisiko: Der Wärmepreis wird in einem langfristigem Vertrag vereinbart, wodurch die Kosten für Raumheizung und Warmwasser kalkulierbar und transparent werden. Der Kunde bezahlt für die effektiv bezogene Wärme. Alle Aufwendungen für Investition, Betrieb und Unterhalt sind im Wärmepreis enthalten.

Contracting bedeutet auch technisch langfristige Sicherheit bei der Wärmeversorgung: Die komplette Wärmeversorgungsanlage wird von Fachleuten professionell geplant, gebaut, betrieben, unterhalten und finanziert. Zudem wird die Wärme mit den drei unabhängigen Energieträgern Abwasser, Elektrizität und fossile Brennstoffe (Gas oder Öl bei bivalenter Auslegung) erzeugt. Somit besteht keine einseitige Abhängigkeit in Bezug auf Energie-Reserven und Energiepreise.

Ein fortschrittliches Energiekonzept - wie die Wärmenutzung aus Abwasser - kann auch die Attraktivität und damit den Wert einer Liegenschaft erhöhen. Gemäss Untersuchungen legen Bauherren denn auch immer mehr Wert auf ökologische Aspekte.

Kläranlagen- und Kanalisationsbetreiber können in Contracting-Verträge miteinbezogen werden, indem sie z. B. Wartung und Unterhalt der betreffenden Anlagen in der Kanalisation oder auf der Kläranlage nach genauen Vorgaben und gegen Entschädigung des Contractors übernehmen und in die bestehenden routinemässigen Wartungsabläufe integrieren. Der Einbezug des Kläranlagen- und Kanalisationsbetreibers sollte in jedem Fall geregelt werden (s. Kapitel 11).

### Kosten für den Wärmeentzug, Besitzverhältnisse und Schadens- bzw. Haftungsregelungen

Die Wärme aus dem Abwasser ist grundsätzlich ungenutzte Abwärme und deshalb als solche unentgeltlich für jedermann frei zu nutzen. Durch die Nutzung von Abwasserwärme zur Beheizung von Gebäuden werden in der Regel fossile Brennstoffe (Erdöl, Erdgas) substituiert oder bei Elektroheizungen Strom eingespart, was zu erheblichen volkswirtschaftlichen Kosteneinsparungen führt. Abwasserwärmenutzungsanlagen werfen in der Regel keinen Gewinn ab. Um die Verbreitung dieser sinnvollen Technologie nicht zu verhindern, sollten Kanalisations- und Kläranlagenbetreiber keine Entschädigung vom Betreiber der Abwasserwärmenutzungsanlage verlangen. Da die Abwasserwärmenutzung im öffentlichen Interesse liegt, wird sie auch von vielen Gemeinden und Städten aktiv, z. T. auch finanziell gefördert.

Eine in der Kanalisation erstellte Abwasserwärmenutzungsanlage ist rechtlich Eigentum des Betreibers oder Bauherren der Abwasserwärmenutzungsanlage, während die Kanalisation, in der die Anlage erstellt wurde, im Besitz des Kanalisationsbetreibers (Kommune, Kommunalverband, Stadt) bleibt.

Der Betreiber einer Abwasserwärmenutzungsanlage kann keine Ansprüche gegenüber dem Kanalisationsbetreiber erheben, falls im Laufe der Zeit kühlere Temperaturen oder geringere Abwassermengen auftreten und sich dadurch die Heizleistung vermindern kann. Da das Kanalisationsnetz durch Langlebigkeit geprägt ist, sind solche Fälle eher selten oder das Risiko (z. B. durch Schliessung von angeschlossenen Industriebetrieben mit grossen Abwassermengen) kalkulierbar.

Jegliche Haftung für Schäden an der Kanalisation, die durch Einbau, Betrieb, Wartung und Unterhalt der Abwasserwärmenutzungsanlage entstehen, muss der Betreiber der Abwasserwärmenutzungsanlage übernehmen. Für Schäden an der Abwasserwärmenutzungsanlage bedingt durch unvorhergesehene Ereignisse wie z. B. Überschwemmungen, Starkregen oder Industriebavarien wird seitens des Kanalisations- oder KA-Betreibers keine Haftung übernommen. Gegebenenfalls können geeignete Versicherungen abgeschlossen werden.

Bei einer Ausserbetriebnahme der Wärmenutzungsanlage muss der Kanal durch den Betreiber der Abwasserwärmenutzungsanlage auf dessen Kosten soweit erforderlich und verhältnismässig in den ursprünglichen Zustand zurückversetzt werden (Rückbau).

### 13 Dimensionierung von Abwasserwärmenutzungsanlagen

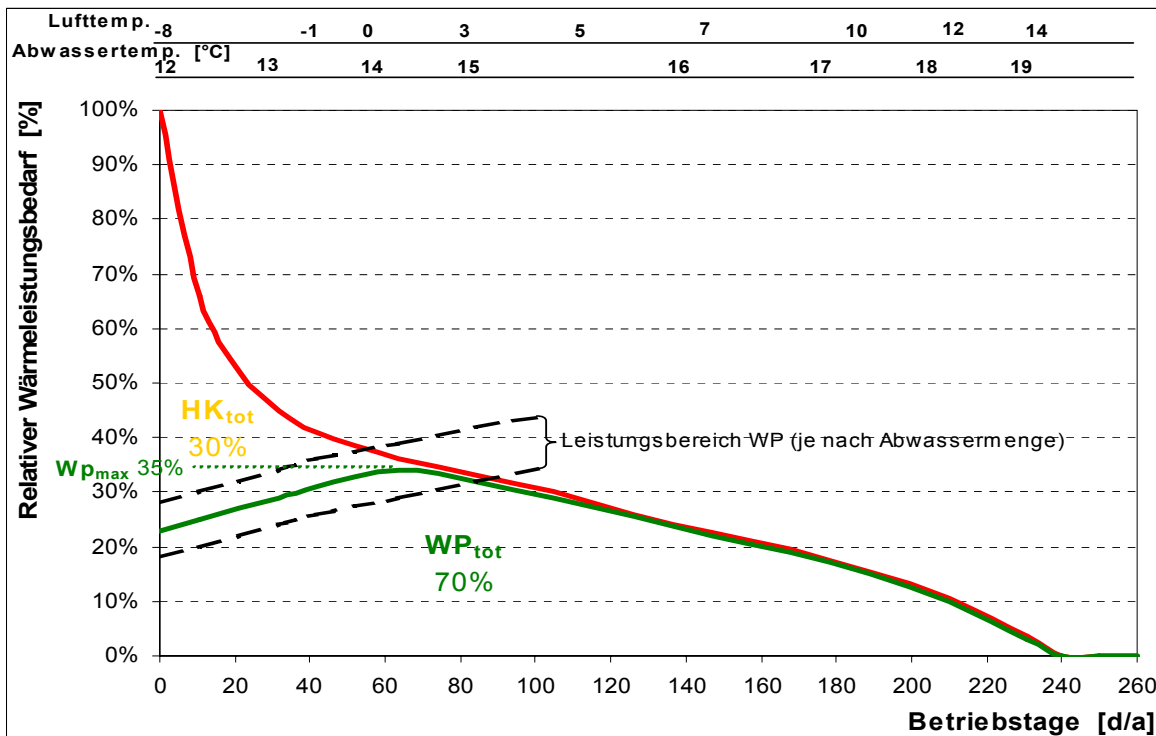
Die Abwasserwärmenutzung stellt an planende und ausführende Ingenieure spezielle Anforderungen. Einerseits geht es um die Auslegung der Heizzentrale mit Wärmepumpe, andererseits um die Wärmeentnahme aus dem Abwasser und die möglichen Folgen für die Abwasserreinigung. Die für die Wärmeentnahme benötigten Wärmetauschersysteme sind kostenintensiv und damit oft für die Wirtschaftlichkeit einer Abwasserwärmepumpe ausschlaggebend.

Die Auslegung und eine technisch einwandfreie Ausführung der Installation der Wärmetauscher mit zugehörigem Sekundärkreislauf und Wärmepumpe (Heizsystem) sind für optimale Wirtschaftlichkeit und sicheren Betrieb grundlegend. Andererseits muss auch dem Einfluss der Abkühlung des Abwassers auf den Betrieb einer nachgeschalteten Kläranlage bereits bei der Planung Rechnung getragen werden. Da es sich im Kanalnetz um dynamische Prozesse handelt, müssen unterschiedlichste Einflussgrößen beurteilt werden: unterschiedliche Kanalprofile und Gefälle, schwankende Abwassertemperaturen, Ablagerungen auf der Wärmetauscheroberfläche (Veränderung des Wärmeübergangs) sowie Einfluss der Wärmeentnahme auf den Betrieb der Kläranlage.

Das Medium Abwasser ist den meisten Ingenieuren aus dem Heizungs/Lüftungs/Klima-Bereich wenig bekannt. Umgekehrt ist der Heizungs/Lüftungs/Klima-Bereich den Siedlungswasserbau- und Abwasser-Ingenieuren wenig geläufig. Deshalb ist für eine erfolgreiche Planung und Realisierung von Abwasserwärmenutzungsanlagen die Zusammenarbeit von Heizungs/Lüftungs/Klima- und Siedlungswasserbau-Ingenieuren unumgänglich. Im Folgenden werden die wichtigsten Schritte für die Auslegung einer Abwasserwärmepumpe dargelegt.

#### 1. Wärmebedarf / Leistungsaufteilung Wärmepumpe - Spitzenkessel

Die Leistungsaufteilung zwischen Wärmepumpe (WP) und Heizkessel (HK) erfolgt anhand eines Wärmeleistungsdiagrammes. Dieses zeigt den Heizleistungsbedarf in Funktion der Anzahl Betriebstage eines Jahres (Jahresdauerlinie des Wärmebedarfes) sowie die Leistungskurve der Wärmepumpe. Abb. 24 zeigt ein Wärmeleistungsdiagramm für ein Gebäude mit bivalenter Abwasserheizung.



**Abb. 24:** Wärmeleistungsdiagramm für ein Gebäude mit bivalenter Abwasserheizung. Rot die Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfes, grün der Einsatzbereich der Wärmepumpe (WP), gelb der Einsatzbereich des Heizkessels (HK). Die Fläche unter der Jahresdauerlinie entspricht dem jährlichen Gesamtwärmebedarf.

Bivalente WP-Anlagen sind wirtschaftlicher und sicherer im Bezug auf Betriebsausfälle, weshalb die bivalente Auslegung zusammen mit einem Gas- oder Ölheizkessel vor allem bei grösseren WP-Anlagen ab 50 kW Gesamtleistung empfohlen wird. Die Auslegung gemäss Beispiel in Abb. 24 ist in den meisten Fällen anwendbar und empfehlenswert:

Die WP wird auf eine Maximalleistung von 30-40% der maximal nötigen Heizleistung (an den kältesten Tagen im Winter) ausgelegt. Die restlichen 60-70% der Maximalleistung (Spitzenlast) übernimmt ein herkömmlicher Heizkessel (HK). Bei dieser Auslegung ergibt sich eine Deckung von 70-80% des Gesamt-Jahreswärmebedarfs durch die WP, und nur 20-30% müssen vom HK geliefert werden. Dadurch wird die benötigte WP viel kleiner und günstiger, als wenn sie 100% des Leistungsbedarfs auch an den kältesten Tagen abdecken müsste. Das Beispiel in Abb. 24 zeigt, dass bei Normalbetrieb der WP auch an den kältesten Tagen der HK nur ca. 75% der Gesamtleistung liefern muss. Wird mit dem Kläranlagen-Betreiber eine Abschaltung der Wärmepumpe bei zu niedrigen Abwassertemperaturen vereinbart, muss der HK dennoch auf 100% der Heizleistung dimensioniert werden.

Zahlenbeispiel: Maximalleistungsbedarf 800 kW → WP mit max. Leistung 240-320 kW, Heizkessel mit max. Leistung 800 kW

Bei der Bereitstellung von Warmwasser muss die Situation speziell betrachtet werden, da dafür höhere Vorlauftemperaturen erforderlich sind (> 60 °C, Verhinderung von Legionellen). Es ist empfehlenswert, in der kalten Jahreszeit die Warmwasseraufbereitung mittels HK zu gewährleisten, damit die WP mit tieferen Vorlauftemperaturen und damit effizienter arbeiten kann. Wenn keine Heizwärme mehr nötig ist (ab Apr. bis Sept.), kann die Wärmepumpe auch die Warmwasseraufbereitung übernehmen (separates Wärmenetz).

## 2. Wärmeangebot aus dem Abwasserkanal

Die Heizleistung der WP steigt mit zunehmender Abwassertemperatur. Zudem kann der Leistungsbereich je nach Abwassermenge variieren. Die Auslegung muss demnach auf einen mittleren Abwasseranfall und die tiefsten Abwassertemperaturen im Winter erfolgen. In Abb. 25 ist eine typische Tagesganglinie des Trockenwetterabflusses in einer deutschen Kanalisation dargestellt. Eine solche Tagesganglinie sollte als Grundlage für die Berechnung der Wärmemenge aus dem Abwasser verwendet werden.

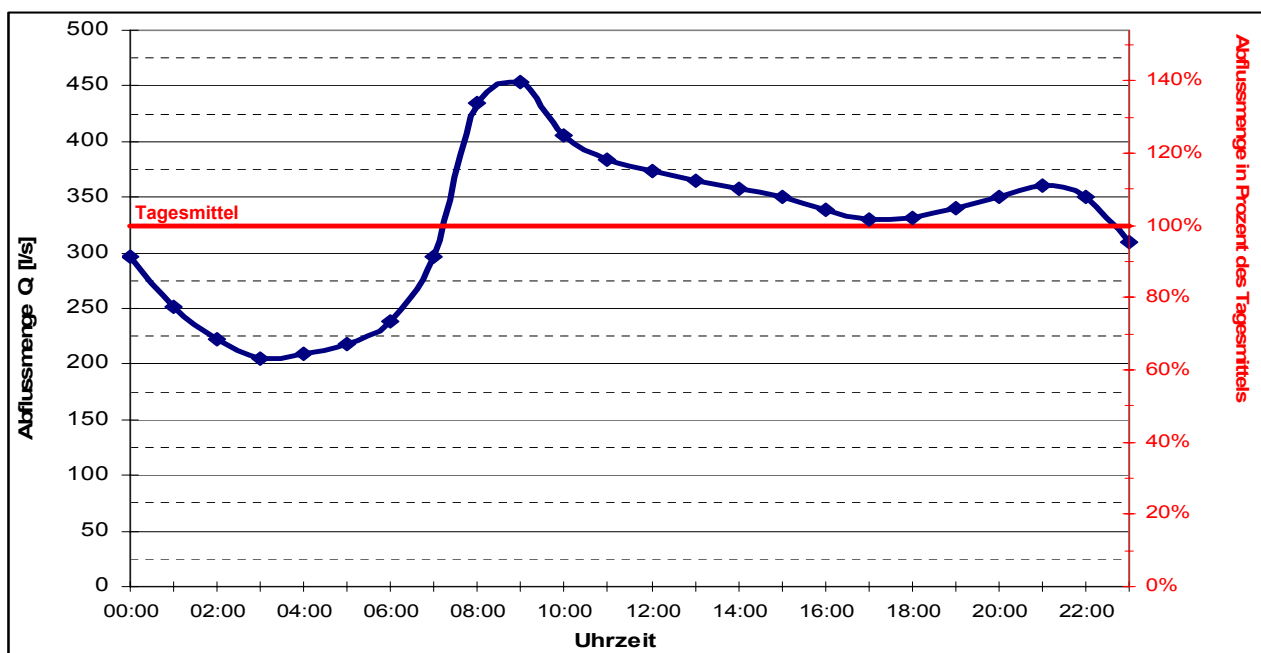


Abb. 25: Typische Abfluss-Tagesganglinie bei Trockenwetter in einer mittelgrossen Kanalisation in Deutschland (ca. 50'000 EW)

Wärmepumpe und Wärmetauscher werden im Normalfall auf das Wärmeangebot bei der mittleren Trockenwetterabflussmenge pro Tag (Tagesmittel) der 6 Wintermonate (Oktober bis März) ausgelegt. Um bei der Dimensionierung auf der absolut sicheren Seite zu stehen, kann auch auf den minimalen Nachtabfluss ausgelegt werden. Dieser beträgt durchschnittlich ca. 60% des Tagesmittelwertes (Erfahrungswert, gem. Abb. 25).

Falls für die Dimensionierung keine Tagesganglinie zur Verfügung steht, kann die massgebende Abflussmenge auch durch Einzelmessungen bestimmt werden: Aus der typischen, repräsentativen Tagesganglinie (Abb. 25) ist ersichtlich, die Abflussmenge im Zeitraum von 16:00 bis 19:00 Uhr in etwa dem Tagesmittel entspricht. Mit einer Abflussmessung in diesem Zeitraum erhält man die massgebende Abflussmenge mit befriedigender Genauigkeit. Aus Erfahrung ist das Wärmeangebot im Abwasser in den meisten Fällen sowieso nicht der limitierende Faktor. Soll trotzdem zusätzliche Sicherheit eingebaut und auf minimalen Abfluss dimensioniert werden, kann von 60% der gemessenen Abflussmenge ausgegangen werden.

### 3. Auslegung des Wärmetauschers

Aus der Auslegung der Wärmepumpe (WP) und der angenommenen Leistungsziffer (COP) ergibt sich die nötige Abwasserwärme-Entzugsleistung, das heisst die Wärmeübertragungsleistung  $W_A$  des Wärmetauschers (WT).

Zahlenbeispiel: WP-Leistung = 250 kW, COP = 4 → nötige WT-Leistung  $W_A$  = 190 kW

Durch Formel 1 (s.a Kapitel 4) ist der Zusammenhang zwischen  $W_A$ , der Dimensionierungs-Abwassermenge  $Q_A$  und der Temperaturabnahme des Abwassers  $\Delta T_A$  gegeben ( $c_W \cdot \rho_W = 4,19 \text{ kWs/(l}\cdot\text{K)}$ ).

$$\Delta T_A = \frac{W_A}{c_W \cdot \rho_W \cdot Q_A}$$

Formel 1

Mit Formel 2 (s. Kapitel 4) kann die resultierende Temperaturabnahme im Zulauf zur Kläranlage ermittelt werden. Gegebenenfalls (Temperaturabnahme im Kläranlagen-Zulauf > 0,5 K und/oder Temperatur Kläranlagen-Zulauf < 10°C, s. Kapitel 5) muss der Einfluss auf den Kläranlagen-Betrieb überprüft werden (s. Kapitel 6).

$$T_{res} = \frac{\text{Summe}(Q_i \cdot T_i)}{\text{Summe}(Q_i)}$$

Formel 2

Zahlenbeispiel:  $W_A = 190 \text{ kW}$ ;  $Q_A = 200 \text{ l/s}$  →  $\Delta T_A = 0,23 \text{ K}$  → Einfluss auf KA kann vernachlässigt werden

Anhand der benötigten WT-Leistung  $W_A$  muss als letzter Schritt mit Formel 3 (s. Kapitel 9) Art und Grösse (austauschwirksame Oberfläche  $A_{WT}$ ) des Wärmetauschers bestimmt werden.

$$W_A = k \cdot A_{WT} \cdot \Delta T$$

Formel 3

Die Wärmetauscherhersteller geben theoretische systemspezifische Werte für den Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$  [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ] an.  $\Delta T$  ist der Temperaturunterschied zwischen dem Abwasser (für die Auslegung sind die kältesten Abwassertemperaturen im Winter massgebend) und dem im Wärmetauscher zirkulierenden Medium (Sekundärkreislaufmedium).  $\Delta T$  stellt sich anhand der Verdampfer-Leistung der WP und dem  $k \cdot A_{WT}$ -Wert des WT ein. Als Sekundärkreislauf-Medium ist Wasser physikalisch optimal und zu empfehlen, da es den bestmöglichen Wärmeübergang liefert. Es besteht aber die Gefahr der zu starken Abkühlung und des Gefrierens in der WP, weshalb in Grenzfällen auch ein Wasser-Glykol-Gemisch (zähflüssiger als Wasser) eingesetzt werden kann. Dies hat jedoch eine Verringerung des Wärmeübergangs und einen grösseren Energieverbrauch bei der Zwischenkreispumpe zur Folge.

Weiter ist beim  $k$ -Wert die Verschmutzung des Wärmetauschers durch Biofilmbildung, der sogenannte Fouling-Factor, ein wichtiger zu beachtender Faktor (s. Kapitel 7). Dieses Problem ist in Deutschland gewichtiger als in der Schweiz, da tendenziell mehr im Trennsystem entwässert wird. Das bedeutet einerseits geringeren Abfluss → weniger Spüleffekt → stärkere Verschmutzung, was evtl. eine periodische Reinigung nötig macht, andererseits aber höhere Abwassertemperaturen auch im Winter erwarten lässt. In Deutschland ist im Mittel damit zu rechnen, dass der theoretische  $k$ -Wert eines Wärmetauschers auf einen um ca. 30% - 40% geringeren für die Dimensionierung massgebenden  $k$ -Wert verringert wird (ohne periodische Reinigung). Falls keine Reinigung vorgesehen ist, sollte also durch Biofilmbildung mit einer Verminderung der theoretischen Wärmeübertragungsleistung von 30% - 40% gerechnet werden. Sowohl Erfahrungen mit realisierten Anlagen als auch die Laboruntersuchungen der EAWAG zeigen sehr unterschiedliche Verhältnisse bei der Wärmetauscherverschmutzung. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Abwasserparameter und hydraulischen Verhältnisse ist keine Vereinheitlichung möglich. Die Verschmutzung bzw. Reinigung muss von Fall zu Fall beurteilt werden, was oft erst nach einer gewissen Betriebszeit möglich ist. Sicherheitshalber ist der Wärmetauscher grosszügig auszulegen (Faktor 1,5) und die Verschmutzung damit in Kauf zu nehmen, oder es ist eine periodische Reinigung (je nach Verschmutzung alle 2 Monate bis halbjährlich - die Intervalle müssen durch Betriebsüberwachung festgelegt werden) durch ein Kanalreinigungsunternehmen vorzunehmen.

Von folgenden Richtwerten für die spezifische Wärmetauscher-Leistung kann für die Dimensionierung ausgegangen werden: 3-4  $\text{kW}/\text{m}^2$  bei geringer Verschmutzungsgefahr od. vorgesehener periodischer Reinigung / 2-3  $\text{kW}/\text{m}^2$  ohne Reinigung.

Zahlenbeispiel: Der  $k$ -Wert von 860  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  muss aufgrund der Verschmutzung für eine sichere Dimensionierung auf rund 500  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  verringert werden. Damit ergibt sich bei einer Temperaturdifferenz des Sekundärkreislaufes  $\Delta T$  von 4 K aus Formel 3 eine nötige Wärmetauscheroberfläche von  $A_{WT} = 190 \text{ kW} / 0,5 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / 4 \text{ K} = 95 \text{ m}^2$ . Dies entspricht einer spezifischen Wärmetauscherleistung von 2  $\text{kW}/\text{m}^2$ .

Bei der Bestimmung der Wärmetauschergeometrie (Anzahl Elemente, Einbauweise) anhand der nötigen Wärmetauscher-Oberfläche  $A_{WT}$  muss auch darauf geachtet werden, dass der Wärmetauscher auch bei minimalem Abfluss dauernd mit Abwasser bedeckt ist, um Verluste zu vermeiden. Die entsprechende Berechnung erfolgt anhand der gängigen Formeln für die Hydraulik (Bestimmung des benetzten Umfanges bei minimaler Abflusstiefe).



## 14 Praxistipps zur Wärmepumpentechnik

### Wärmequelle

Eine Wärmepumpe benötigt grundsätzlich eine Wärmequelle, aus der sie die Umgebungswärme schöpft. Als Wärmequelle kommen üblicherweise Luft, Erdreich, Grund- und Oberflächenwässer oder Abwärme in Frage. Eine Wärmequelle ist um so geeigneter, je höher ihre Temperatur und Ergiebigkeit ist.

Wärmequelle	Bemerkungen, Vorteile, Nachteile
Luft	Beliebig verfügbar, keine Genehmigungen und Gebühren, evtl. Lärmprobleme, mässige Arbeitszahlen
Erdreich	Je nach Ort Genehmigung und Gebühren, grosser Flächenbedarf (Unterscheidung horizontal od. vertikal), hohe Arbeitszahlen
Grundwasser	Genehmigung erforderlich, evtl. Gebühren, bei Grosswärmepumpen billiger als Erdwärmesonden, hohe Arbeitszahlen
Oberflächenwasser (vor allem Seewasser)	Genehmigung erforderlich, evtl. Gebühren, grosse Ergiebigkeit, Massnahmen zur sicheren Selbstansaugung nötig, hohe Arbeitszahlen
Abwärme	<b>Abwasser-Wärme</b> , Warmluft aus Garagen, Autobahntunnels, Tunnelwasser, industrielle Abwärme, WRG aus Abluftanlagen: in der Regel keine Genehmigung erforderlich, keine Gebühren, hohe Arbeitszahlen

Quellen- und Senkentemperatur sind die zentralen Grössen für den optimalen Betrieb einer Wärmepumpe. Grundsätzlich gilt: Je höher die Quellentemperatur und je tiefer die Senkentemperatur (Vorlauftemperatur ab Kondensator), desto höher ist die Leistungszahl.

Ist die Quellentemperatur gegeben, lässt sich nur noch die Zuführung des Quellenmediums (Sekundärkreislauf) optimieren. Hier gilt es einerseits die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt (Verdampfer) und andererseits die Druckverluste in den Flüssigkeitsleitungen (oder den Luftkanälen) möglichst klein zu halten. Die Optimierung des Temperaturabstandes zwischen der Quellentemperatur und der Verdampfungstemperatur über dem Verdampfer hängt von der Umwälzpumpenleistung und der Leistungszahl der Wärmepumpe (COP) ab. Vergrössert man die Temperaturdifferenz über dem Verdampfer, sinkt die Pumpleistung in der dritten Potenz zur Massenstromveränderung und diese ist indirekt proportional zur Temperaturspreizung zwischen Ein- und Austritt der Wärmequelle. Andererseits sinkt der COP einer Wärmepumpe durch die Veränderung der mittleren Temperatur im Verdampfer.

Bei einer leistungsvariablen Wärmepumpe sollte unbedingt der Massenstrom im Sekundärkreislauf der aktuellen Leistung angepasst werden. Dies kann über eine drehzahlgeregelte Umwälzpumpe geschehen. Als Führungsgrösse der Regelung kann der Verdampfungsdruck oder die Temperaturdifferenz über dem Verdampfer im Sekundärkreislauf (quellenseitig) verwendet werden.

### Wärmesenke (Wärmeverbraucher)

Auf der Seite des Wärmebezugs (Senkenseite, Nutzwärme) gelten bezüglich Temperaturdifferenz und Massenstrom (Primärkreislauf) die gleichen Argumente, wie bei der Wärmequelle. Die maximal notwendigen Heiztemperaturen (Vorlauftemperaturen) sollten möglichst niedrig gehalten werden. Ein wichtiger Punkt ist die Rücklauftemperatur der Heizanlage. Dieser Rücklauf entspricht direkt der Kondensator-Zulauftemperatur und sollte einen Maximalwert, der abhängig vom Kondensationsdruck und der Temperaturdifferenz über den Kondensator ist, deutlich unterschreiten.

Bei der Wahl der Betriebstemperaturen auf der Kondensatorseite ist zudem als weiterer wichtiger Punkt die Unterkühlung in der Maschine zu beachten. Es spielt eine grosse Rolle, in welchem Temperaturbereich (Differenz von Vorauf- und Rücklauftemperatur der Senke) die Maschine betrieben wird. So kann eine grössere Temperaturdifferenz über dem Kondensator zu höheren Kondensationstemperaturen führen, die sich aber durch die grössere Unterkühlung trotzdem positiv auf den COP auswirken.

Bei der hydraulischen Einbindung der Wärmepumpe in den Heizkreislauf werden häufig Fehler gemacht. Prinzipiell ist eine möglichst einfache Einbindung von Vorteil. Die Entkoppelung der Massenströme über die Wärmepumpe und die Verbraucherkreisläufe mit einem parallel eingebundenen Speicher bietet bei grösseren Anlagen wesentliche Vorteile. Sind die Massenströme nicht sauber entkoppelt, spielen die Massenströme, resp. deren Abgleichung, eine grosse Rolle. Der Primärkreislauf sollte in diesem Falle immer grösser sein als der Sekundärkreislauf.

## Pufferspeicher

Ein Wärmespeicher kann kurzfristig auftretende Leistungsschwankungen abfangen. Die Wärmepumpe kann immer mit voller Leistung auf den Speicher gefahren werden. Wird ein Speicher mit Stufenladung betrieben, d.h. dass der Speicherinhalt mehrmals umgewälzt wird bis die Endladetemperatur im Speicher erreicht ist, hat dies gegenüber einer Schichtladung mit geregelter Vorlauftemperatur energetische Vorteile. Bei der Schichtladung wird die Vorlauftemperatur ab Ladebeginn auf dem Endladewert hochgehalten und dadurch über den gesamten Ladevorgang betrachtet eine höhere mittlere Temperaturspreizung über dem Kondensator gefahren. Dies wirkt sich auf die Arbeitszahl der Wärmepumpe negativ aus.

## Kältemittel und Kompressoren (Verdichter)

Zentral für den Betrieb einer Wärmepumpe ist die Wahl eines geeigneten Kältemittels. Dieses muss den gegebenen Temperaturen auf Wärmequellenseite (Sekundärkreislauf) und Heizungsseite (Primärkreislauf) optimal entsprechen. In Spezialfällen kann sogar in Erwägung gezogen werden, dass ein Zweistufen-Betrieb mit zwei separaten Maschinen, die verschiedene Kältemittel haben, optimaler ist. Die eingesetzten Kältemittel müssen den aktuellen gesetzlichen Anforderungen an den Umweltschutz genügen (FCKW- und FKW-frei, keine Zerstörung der Ozonschicht, niedriges Treibhauspotential). Abb. 26 zeigt eine Auswahl solcher Alternativ-Kältemittel.

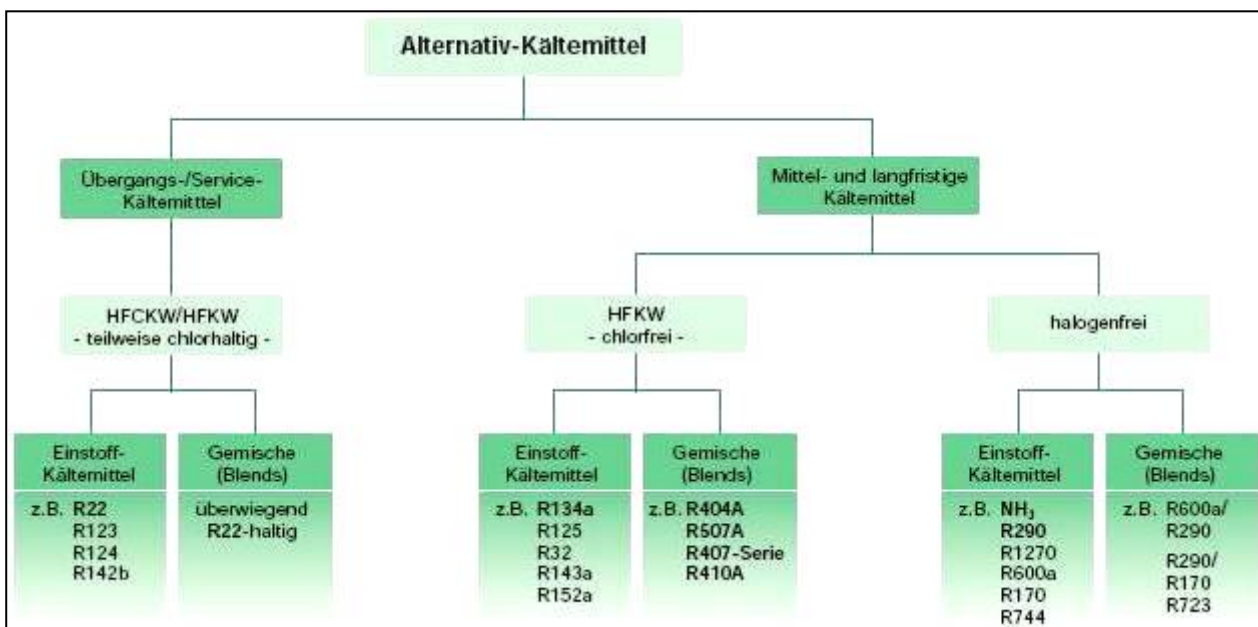


Abb. 26: Übersicht über alternative Kältemittel (Quelle: www.bitzer.de, Kältemittelreport)

Die Wärmepumpe sollte sich im Betrieb dem schwankenden Wärmebedarf anpassen. Es ist nicht sinnvoll, eine Grosswärmepumpe leistungsmässig einstufig zu betreiben, wenn der Bedarf stark schwankt, wie bei der Raumwärme über den jahreszeitlichen Verlauf. Die Leistung sollte angepasst werden, indem die Wärmepumpe mehrstufig betrieben wird. Es gibt mehrere Verfahren, wie die Wärmeabgabe einer Wärmepumpe variiert werden kann. Wichtig ist es, ein Verfahren zu wählen, bei dem auch im Teillastbereich ein guter Wirkungsgrad erreicht wird. Vereinbart der Bauherr mit dem Lieferanten der Wärmepumpe oder dem Planer eine verbindliche Jahresarbeitszahl, so wird der Lieferant automatisch zum Ziel haben, einen guten Teillastwirkungsgrad zu erreichen. Spielt die Betriebssicherheit eine grosse Rolle, kann die Wärmepumpe mit zwei oder mehreren Kältekreisläufen gebaut werden. Damit ist gewährleistet, dass beim Ausfall einer Maschine die andere ohne Einschränkung weiter betrieben werden kann. Die bivalente Auslegung mit einem Heizkessel für die Spitzenlastdeckung (Öl- oder Erdgasheizkessel) ist ebenfalls eine wirtschaftliche und interessante Lösung (s. Kapitel 13).

Die Wahl der Verdichter ist bei Gross-Wärmepumpen ebenfalls ein Thema. Bei mittleren Leistungen werden Wärmepumpen oft mit Scroll-Verdichtern ausgerüstet. Bei grösseren Leistungen (ab ca. 200 kW) empfehlen sich eher Schraubenverdichter. Bei ganz grossen Einheiten werden auch Turboverdichter eingesetzt. Die bewährten Kolbenverdichter findet man wegen ihrer Robustheit immer noch in vielen Anwendungsfällen. Bei Geräten aus der Klimatechnik ist zu beachten, dass der Einsatz als Abwasserwärmepumpe ein wesentlich höheres Verdichtungsverhältnis erfordert.

## 15 Potenzialstudien, Grobanalysen und Machbarkeitsstudien

### Potenzialstudien

Das Ziel von Potenzialstudien ist es, geeignete Standorte für Abwasser-Wärmepumpen zu ermitteln und damit eine geeignete Grundlage für zukünftige Realisierungen zu schaffen. Als einfaches Instrument dafür dienen kommunale Energiekarten. Die Kommune ist eine Schlüsselstelle bei der Suche nach geeigneten Standorten für die Abwasserwärmenutzung. Sie ist in den meisten Fällen zuständige Behörde für die Bewilligung einer Wärmeentnahme aus dem Kanal. Vor allem aber verfügt sie über die Pläne mit den geeigneten Kanälen mit Durchmessern von mindestens 80 cm und das zuständige Werkhof-Personal verfügt über die nötigen Betriebserfahrungen und Ortskenntnisse. Auf der Basis von Stadt- und Werkplänen im grösseren Massstab (1:1'000 bis 1:5'000) werden geeignete Kanäle grob eingetragen. Zusammen mit Vertretern der Kommune werden anhand dieses Plans potenziell geeignete Wärmeverbraucher in der Nähe der geeigneten Kanäle ausfindig gemacht. Im Gespräch mit ortskundigen Vertretern der Kommune (Bürgermeister, Bauamt, Werke) gelingt es oft innerhalb kurzer Zeit, interessante Standorte zu identifizieren. Dabei stehen zunächst Neubaugebiete (Wohnsiedlungen) oder öffentliche Bauten im Vordergrund, aber auch grössere private Gebäude können ins Auge gefasst werden.

### Grobanalysen

In einem zweiten Schritt werden an den mittels Potenzialstudie identifizierten Standorten und Objekten mit Grobanalysen die technischen Lösungen, Kosten und Wirtschaftlichkeit dargelegt. Eine Grobanalyse sollte die folgenden Themen abhandeln (Umfang ca. 10-15 A4-Seiten, inkl. Anhang):

1. Aufgabe und Ziel
2. Grundlagen
  - Ausgangslage der Heizzentrale: Wärmebedarf
  - Ausgangslage im Kanal: Wärmeangebot
3. Grobe Dimensionierung der Heizungsanlage mit Wärmepumpe
4. Wärmeentnahme aus dem Kanal
  - Technisches Konzept
  - Beurteilung, inkl. grobe Abschätzung der Auswirkungen auf die Kläranlage (Zulauftemperatur)
5. Kostenschätzungen
  - Eckdaten (Zinssätze, Lebensdauer, etc.)
  - Investitionskosten, Betriebskosten (Strom, Brennstoffe) und sonstige Kosten
6. Wirtschaftlichkeit
  - spezifische Wärmekosten
  - Amortisation
7. Weiteres Vorgehen, Terminplan, Ausblick

Anhänge: Lageplan, Technische Skizzen Wärmeentnahme, Wärmekostenvergleich

### Machbarkeitsstudien

Zeigt eine Grobanalyse, dass die Abwasserwärmenutzung am betrachteten Standort realisierbar ist, muss als nächster Schritt für den gleichen Standort eine vertiefende Machbarkeitsstudie durchgeführt werden. Diese ist grundsätzlich gleich gegliedert wie die Grobanalyse, hat aber bereits den Status eines Vorprojektes. Die Machbarkeitsstudie beinhaltet genaue Abklärungen und Optimierungen von technischem Konzept, Auswirkungen auf die Kläranlage, Wirtschaftlichkeitsberechnungen, ökologische Betrachtungen (CO<sub>2</sub>-Bilanz).

Kommunen und Bauherren stehen in Deutschland und der Schweiz alternativen Heizanlagen, die wirtschaftlich sind und von Dritter Seite finanziert werden können, grundsätzlich offen gegenüber. Die bisherige Erfahrung mit Grobanalysen und Machbarkeitsstudien hat gezeigt, dass die Ausgangslage für ein wirtschaftliches Ergebnis entscheidend ist. Grössere Objekte, die in der Nähe von Kanälen mit ausreichender Abwassermenge liegen, und bei denen die Vorlauftemperaturen des Heizsystems nicht zu hoch liegen (35-50 °C), liegen bereits heute, auch ohne Förderbeiträge, knapp unter der Wirtschaftlichkeitsgrenze.

## 16 Grundlagen für die Berechnung von Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die spezifischen Energieinhalte und die CO<sub>2</sub>-Emissionsmengen für verschiedene fossile Energieträger. Mit diesen Werten als Basis können Energie- und CO<sub>2</sub>-Emissions-Berechnungen für Abwasser-Wärmepumpen durchgeführt werden. Dies wird anhand eines Beispiels verdeutlicht.

Energieträger	GJ pro t	GJ pro Hohlmass
Kohle	28,1	
Erdöl HEL	42,6	36,0 pro 1'000 l
Erdöl HS	41,2	39,1 pro 1'000 l
Erdgas	46,5	36,3 pro 1'000 Nm <sup>3</sup>
Benzin	42,5	31,7 pro 1'000 l
Diesel	42,8	35,5 pro 1'000 l
Kerosen	43,0	34,4 pro 1'000 l

Umrechnung Energieeinheiten:

$$3,6 \text{ MJ} = 1 \text{ kWh}$$

$$0,278 \text{ kWh} = 1 \text{ MJ}$$

$$278 \text{ kWh} = 1 \text{ GJ}$$

Abkürzungen:

k (kilo)	10 <sup>3</sup>
M (Mega)	10 <sup>6</sup>
G (Giga)	10 <sup>9</sup>
T (Tera)	10 <sup>12</sup>

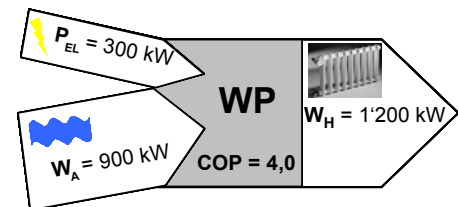
Energieträger	tCO <sub>2</sub> pro TJ	tCO <sub>2</sub> pro t	tCO <sub>2</sub> pro Hohlmass
Kohle	94,0	2,64	
Erdöl HEL	73,7	3,14	2,65 pro 1'000 l
Erdöl HS	77,0	3,17	3,01 pro 1'000 l
Erdgas	55,0	2,56	2,00 pro 1'000 Nm <sup>3</sup>
Benzin	73,9	3,14	2,34 pro 1'000 l
Diesel	73,6	3,15	2,61 pro 1'000 l
Kerosen	73,2	3,15	2,52 pro 1'000 l

Energieträger	t pro Hohlmass
Kohle	
Erdöl HEL	0,845 t pro 1'000 l
Erdöl HS	0,950 t pro 1'000 l
Erdgas	0,780 t pro 1'000 Nm <sup>3</sup>
Benzin	0,745 t pro 1'000 l
Diesel	0,830 t pro 1'000 l
Kerosen	0,800 t pro 1'000 l

### Beispiel:

Eine Abwasser-Wärmepumpe mit einer **Gesamtheizleistung** von **1'200 kW** arbeitet mit einer Leistungsziffer **COP** von **4,0**. Die dem Abwasser entnommene Wärme (Wärmetauscherleistung) beträgt damit

$$(1'200 \text{ kW} / 4) * 3 = \mathbf{900 \text{ kW}}$$



Diese 900 kW Umweltwärme sind erneuerbare Energie, die fossile Energie ersetzt, z. B. Erdöl HEL. Die für die Wärmepumpenantrieb benötigte Primärenergie von 300 kW wird in diesem Beispiel durch ein mit Biogas betriebenes Blockheizkraftwerk geliefert. Diese Energie wird zu 50% (150 kW) als erneuerbare Energie angerechnet. Damit ergibt sich also eine substituierte Leistung von insgesamt 1'050 kW.

Bei durchschnittlich 4'800 Betriebsstunden pro Jahr ergibt sich eine Gesamtenergiemenge von

$$1'050 \text{ kW} * 4'800 \text{ h/a} = 5'040'000 \text{ kWh/a} = \mathbf{18'130 \text{ GJ pro Jahr}}$$

Um diese Energiemenge mit Erdöl HEL zu erreichen, braucht man gemäss Tab. 1

$$18'130 \text{ GJ} / 36,0 \text{ GJ/1'000 l} = 18'130 \text{ GJ} / 0,036 \text{ GJ/l} = \mathbf{504'000 \text{ l Erdöl HEL pro Jahr}}$$

Durch Einsparung dieser Menge Erdöl HEL reduziert sich die Menge der CO<sub>2</sub>-Emissionen gem. Tab. 2 um

$$504'000 \text{ l/a} * 2,65 \text{ tCO}_2/1'000 \text{ l} = \mathbf{1'340 \text{ tCO}_2 \text{ pro Jahr}}$$

## 17 Grundlagen für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit

### Investitionskosten

Da die verschiedenen Wärmetauscher-Systeme noch nicht lange auf dem Markt sind, sind noch keine verlässlichen Preise verfügbar. Für Wirtschaftlichkeitsberechnungen kann von den folgenden Richtpreisen für Wärmetauscher ausgegangen werden. In den Kosten sind alle baulichen Massnahmen (Montagearbeiten und Tiefbau Kanal) sowie Kosten für Vor- und Rücklaufleitungen im Kanal und Kosten für eventuelle Provisorien enthalten (inkl. Lieferung und Montage):

- Wärmetauscherelemente mit einer Breite von 0,5 bis 1,5 m: ca. 2'500 € pro Laufmeter
- Wärmetauscherelemente mit einer Breite von 1,5 bis 2,0 m: ca. 3'500 € pro Laufmeter

Die Kosten für Fernwärmeleitungen, Wärmepumpen und Hydraulik sind je nach Objekt sehr verschieden und können nicht verallgemeinert werden. Diese Kosten müssen deshalb bei spezialisierten ortsansässigen Unternehmern (Heizung, Klima, Sanitär) angefragt werden.

### Lebensdauer

Für Wärmepumpen kann eine Lebensdauer von 15 bis 25 Jahren angenommen werden (Erfahrungswert).

Für die Wärmetauscher kann eine Lebensdauer von 30 bis 50 Jahren angenommen werden.

### Kalkulationszins und Annuitätsfaktor

Für den Kalkulationszins sollte 5 - 7 % eingesetzt werden. Zusammen mit den oben erwähnten Lebensdauern ergeben sich die entsprechenden Annuitätsfaktoren gemäss folgender Tabelle:

Nutzungsdauer n [Jahre]	Zinssatz i [%]	Annuitätsfaktor a [%/Jahr]
15	5,0	<b>9,63</b>
15	7,0	<b>10,98</b>
20	5,0	<b>8,02</b>
20	7,0	<b>9,44</b>
25	5,0	<b>7,10</b>
25	7,0	<b>8,58</b>
30	5,0	<b>6,51</b>
30	7,0	<b>8,06</b>
40	5,0	<b>5,83</b>
40	7,0	<b>7,50</b>
50	5,0	<b>5,48</b>
50	7,0	<b>7,25</b>
Formel: $a = 100 * [(1 + i/100)^n * i] / [(1 + i/100)^n - 1]$		

### Kostenentwicklung

Die relativen Erstellungskosten pro kW installierter Wärmeleistung einer Abwasser-Wärmepumpe sind in der Regel umso kleiner, je grösser die Anlage ist.

Verschiedene Bundesländer und bundesweite Förderinstitutionen gewähren unter Umständen Förderbeiträge zur Realisierung von innovativen Abwasser-Wärmepumpen. Eine entsprechende Anfrage schon bei der Projektierung kann also lohnenswert sein

Mit zunehmenden Anzahl an realisierten Anlagen, den gewonnenen Erfahrungen und dem entsprechenden Rationalisierungseffekt, darf in naher Zukunft mit allgemein sinkenden Kosten für gesamte Abwasser-Wärmepumpenanlagen gerechnet werden.

## Adressen für weitergehende Informationen und Beratung



Ryser Ingenieure AG  
Engestrasse 9, CH-3000 Bern 9  
Tel. 0041 31 560 03 03, Fax 0041 31 560 03 04  
info@rysering.ch  
www.rysering.ch



Institut Energie in Infrastrukturanlagen  
Lindenhofstrasse 15, CH-8001 Zürich  
Tel. 0041 44 226 30 90, Fax 0041 44 226 30 99  
energie@infrastrukturanlagen.ch  
www.infrastrukturanlagen.ch



Energieconsulting Stodtmeister  
Tempelhofer Ufer 1a, 10961 Berlin  
Tel. (030) 259 30 960, Fax (030) 259 30 969  
energie@eco-s.net,  
www.eco-s.net



Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung,  
Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG)  
Überlandstrasse 133, CH-8600 Dübendorf  
Tel. 0041 1 823 55 11, Fax 0041 1 823 50 28  
info@eawag.ch  
www.eawag.ch

### Weiterführende Literatur:

„Heizen und Kühlen mit Abwasser – Ratgeber für Bauherren und Kommunen“, 34 Seiten, 10/2005  
Bezug: Bundesverband WärmePumpe (BWP) e.V., Elisabethstrasse 34, 80796 München, Tel. 089 2713021,  
Fax 089 27312891, info@waermepumpe-bwp.de, www.waermepumpe-bwp.de

### 10 Argumente für die Abwasserwärmenutzung:

- Abwasser ist eine einheimische, langfristig sichere und erneuerbare Energiequelle
  - Das Wärmeangebot ist ständig und in grosser Menge verfügbar
  - Die Abwasserwärmenutzung ist umweltfreundlich und CO<sub>2</sub>-neutral
  - Unabhängigkeit von der Preisentwicklung auf dem Erdöl- und Erdgasmarkt
- Wärmepumpen mit der Wärmequelle Abwasser erzielen hohe Wirkungsgrade (JAZ)
- zahlreiche geeignete Abnehmer sind überall in der Nähe der Wärmequelle zu finden
  - Erprobte Technologie: Praxiserfahrungen sind vorhanden
- Kalkulierbare Kosten: Abwasser-Wärmepumpen stehen an der Schwelle zur Wirtschaftlichkeit
  - Professioneller Bau, Betrieb und Unterhalt durch Contracting
- Abwasser-Wärmepumpe als fortschrittliches Energiekonzept bedeutet Imagegewinn in der Umweltpolitik