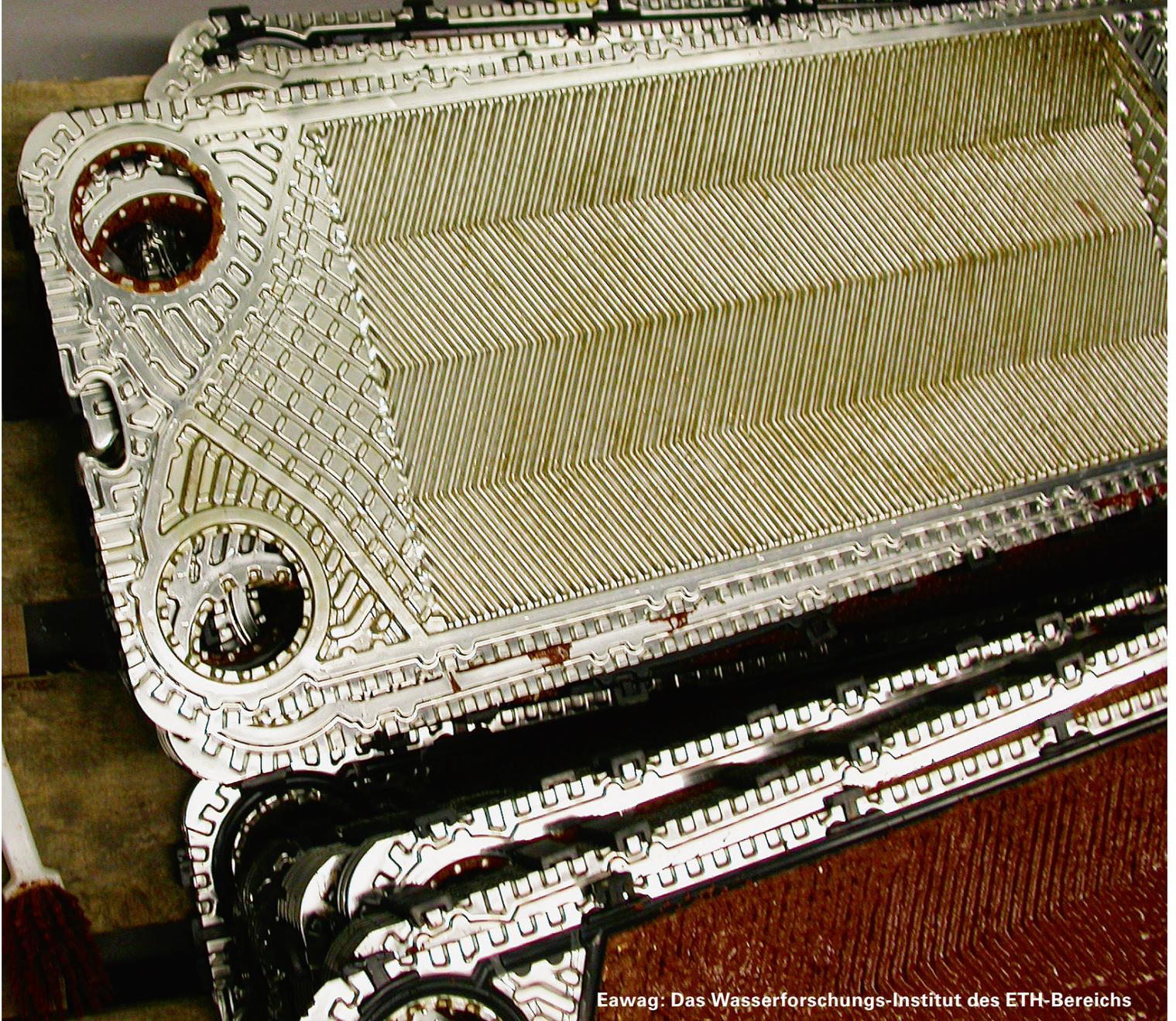


# Wärmerückgewinnung aus **Abwasser**

**Wärmetauscherverschmutzung:  
Auswirkungen und Gegenmassnahmen**



## **Impressum**

### **Herausgeber**

Eawag: Das Wasserforschungs-Institut des ETH-Bereichs  
8600 Dübendorf

### **Autor**

Oskar Wanner

### **Bezug**

Eawag/Empa Bibliothek, Dübendorf  
ISBN-Nr. 978-3-905484-13-7  
Download von <http://library.eawag-empa.ch/schriftenreihe.htm>

### **Zitiervorschlag**

Eawag (Hrsg.) 2009: Wärmerückgewinnung aus Abwasser  
Schriftenreihe der Eawag Nr. 19.

Die Untersuchung wurde gefördert durch den Axpo-Naturstromfonds

### **Titelfoto**

Saubere und verschmutzte Wärmetauscherplatte  
© Eawag, Oskar Wanner

Februar 2009

Schriftenreihe der Eawag Nr. 19

# **Wärmerückgewinnung aus Abwasser**

Untersuchung zu den Möglichkeiten und Grenzen der Abwasserenergienutzung, insbesondere der Wärmetauscherverschmutzung, ihrer Auswirkung und möglichen Gegenmassnahmen in der Praxis

## **Vorwort**

Im Herbst 2008 wurde an der Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwassereinigung und Gewässerschutz (Eawag) ein zweitägiger Kurs zum Thema „Heizen und Kühlen mit Abwasser“ abgehalten. Der Kurs diente vor allem dem Erfahrungsaustausch unter den teilnehmenden Fachleuten und Referenten, sowie der Präsentation der Ergebnisse verschiedener Forschungsprojekte, die in den letzten Jahren an der Eawag durchgeführt worden sind. Der hier vorliegende Bericht beschreibt die Ergebnisse eines dieser Projekte, in dem der Einfluss der Verschmutzung auf den Betrieb und die Leistung von Wärmetauschern auf Anlagen zur Wärmerückgewinnung aus Abwasser in der Praxis untersucht worden ist. Der Bericht dokumentiert aber auch die praktischen Erfahrungen, die Planer und Betreiber von Anlagen zur Abwasserenergienutzung in den vergangenen Jahren gemacht haben, und ohne deren Unterstützung dieses Projekt nicht hätte durchgeführt werden können.

Für die Unterstützung unserer Messkampagnen auf ihren Anlagen danke ich den Verantwortlichen und Betreibern Roger Brand, Orlando Canzoni, Gian-Pietro Giacomini, Markus Hürlimann, Gerhard Koch, Marcel Morath, Ueli Mumentaler, Franz Sager, Bernhard Schmockler und Emil Schneeberger ganz herzlich.

Auch für die Mitteilungen über Betriebserfahrungen mit Anlagen zur Abwasserenergienutzung von Rolf Bartel, Ruedi Bürki, Peter Bütschi, Bruno Edelmann, Peter Giezendanner, Alfred Gründler, Daniel Locher, Urs Nef, Walter Pfeiffer, Ernst Sahli und Peter Stöckli möchte ich mich hier bedanken.

Martin Dietler von der Elektra Birseck Münchenstein und Georg Dubacher vom Elektrizitätswerk der Stadt Zürich gilt mein Dank für die fachliche Begleitung unseres Projekts und Stefan Roth von der Axpo für seine wertvollen Kommentare und Anregungen.

Dem Axpo-Naturstrom-Fonds danke ich für die finanzielle Unterstützung, ohne die der Schritt von der Grundlagenforschung in die Praxis und die Realisierung eines derart aufwendigen Projekts unmöglich gewesen wäre.

Johanna Mieleitner, Patrice Goose und Michele Steiner von wst21 danke ich für die Durchführung der Messungen und Untersuchungen auf den Anlagen und für das Zusammenstellen der Informationen, die diesen Bericht erst möglich gemacht haben.

## Zusammenfassung

Die Untersuchung von 28 mit Abwasser betriebenen Anlagen hat ergeben, dass das Problem der Wärmetauscherverschmutzung, das in der Vergangenheit den Anlagenbetrieb oft massiv beeinträchtigt oder sogar verunmöglicht hat, heute gelöst oder begrenzt werden kann. Zu diesem Ergebnis haben einerseits technologische Entwicklungen und andererseits Innovationen der Anlagenbetreiber beigetragen, die im Bericht erläutert und hier kurz zusammengefasst sind.

Technologische Entwicklungen:

- Selbstreinigende Vorfiltersysteme entfernen vor allem die partikulären Wasserinhaltsstoffe bereits vor den Rohrbündel- und Plattenwärmtauschern aus dem Abwasser.
- Auch durch die Erweiterung der Kläranlagen um eine 4. Stufe (Filtration) werden vor allem die Konzentrationen der partikulären Wasserinhaltsstoffe reduziert.
- Durch Abpumpen des Rohabwassers zu einem ausserhalb der Kanalisation platzierten Wärmetauscher können die selbstreinigenden Vorfiltersysteme auch bei der Nutzung von ungereinigtem Abwasser angewandt werden.
- Mit den heute auf den Anlagen installierten Leitsystemen kann das Ausmass und die zeitliche Entwicklung der Verschmutzung verfolgt werden.
- Fest installierte automatische Spülsysteme führen auf Rohrbündel- und Plattenwärmtauschern in kurzen Zeitintervallen eine chemische Reinigung durch und beugen so einer Verschmutzung des Wärmetauschers vor.

Innovationen der Anlagenbetreiber:

- Es gibt eine ganze Palette von Reinigungsmethoden für Wärmetauscher, welche Anlagenbetreiber in der Praxis erprobt haben und denen sie eine hohe Wirksamkeit attestieren.
- Auf den Anlagen durchgeführte Versuche haben gezeigt, dass für einen bestimmten Wärmetauschertyp nicht immer dieselben Reinigungsmethoden optimal sind.
- Anlagenbetreiber haben die Wirksamkeit kommerzieller Vorfiltersysteme und empfohlener Reinigungsmethoden durch selber entwickelte Anpassungen zum Teil spürbar verbessert.
- Die Erkenntnis, dass Stillstandzeiten der Anlage die Biofilmbildung fördern, veranlasst einzelne Anlagenbetreiber die Abwasserpumpen durchgehend laufen zu lassen oder den Wärmetauscher während Stillstandzeiten mit sauberem Wasser zu füllen.

Bestehende Verbesserungsmöglichkeiten:

- Konstruktive Optimierung der Wärmetauscher zur Vermeidung von Totwasserzonen und engen Durchflussquerschnitten.
- Einrichtungen zur Erzeugung von Druckstössen, die nachweisbar die Ablösung des Biofilms von der Wärmetauscheroberfläche auslösen können.

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>VERFÜGBARES POTENZIAL UND UNTERSUCHTE ANLAGEN IN DER SCHWEIZ</b>	<b>10</b>
	2.1 Potenzial und Wirtschaftlichkeit	10
	2.2 Umfrage unter Anlagenbetreibern	10
	2.3 Nutzungsort, Wärmetauschertyp und Anlagenkonfiguration	11
	2.3.1 Abwasserenergienutzung im Gebäude	12
	2.3.2 Abwasserenergienutzung in der Kanalisation	13
	2.3.3 Abwasserenergienutzung nach der Kläranlage	14
	2.3.4 Anlagenkonfiguration	15
<b>3</b>	<b>VORGEHEN BEI DER PLANUNG UND REALISIERUNG VON PROJEKTEN</b>	<b>16</b>
	3.1 Abwassertechnische Voraussetzungen	16
	3.2 Notwendige Bewilligungen und Vereinbarungen	16
<b>4</b>	<b>ABWASSER ALS URSACHE DER WÄRMETAUSCHERVERSCHMUTZUNG</b>	<b>17</b>
	4.1 Übersicht	17
	4.2 Abwasserinhaltsstoffe	17
	4.2.1 Rohabwasser	17
	4.2.2 Gereinigtes Abwasser	17
	4.3 Abwasserinhaltsstoffe führen zur Verschmutzung des Wärmetauschers	17
	4.3.1 Biofilmbildung	17
	4.3.2 Ablagerung von Feststoffen	18
	4.3.3 Zeitlicher Ablauf der Verschmutzung	18
	4.4 Beobachtungen und Untersuchungen in der Praxis	18
	4.5 Folgerungen	19
<b>5</b>	<b>WÄRMETAUSCHERVERSCHMUTZUNG UND IHRE AUSWIRKUNGEN</b>	<b>20</b>
	5.1 Rohrbündeltauscher	20
	5.1.1 Übersicht der untersuchten Anlagen	20
	5.1.2 Anlage RB1	20
	5.1.3 Anlage RB2	24
	5.1.4 Auswertung der Daten	25
	5.1.5 Folgerungen	25
	5.2 Plattentauscher	26
	5.2.1 Übersicht der untersuchten Anlagen	26
	5.2.2 Anlage PT1	27
	5.2.3 Anlage PT2	28
	5.2.4 Anlage PT3	29
	5.2.5 Anlage PT4	30
	5.2.6 Auswertung der Daten	31
	5.2.7 Folgerungen	32

<b>5.3</b>	<b>Rinnentauscher</b>	<b>33</b>
5.3.1	Übersicht der untersuchten Anlagen	33
5.3.2	Anlage RT1	33
5.3.3	Anlage RT2	35
5.3.4	Auswertung der Daten	37
5.3.5	Folgerungen	38
<b>6</b>	<b>PRÄVENTIVE MASSNAHMEN ZUR VERMINDERUNG DER VERSCHMUTZUNG</b>	<b>39</b>
<b>6.1</b>	<b>Zusammenhang zwischen Typ des Wärmetauschers und Verschmutzung</b>	<b>39</b>
<b>6.2</b>	<b>Zusammenhang zwischen Vorfiltration und Verschmutzung</b>	<b>40</b>
6.2.1	Vorfiltration von gereinigtem Abwasser	40
6.2.2	Vorfiltration von Rohabwasser	41
6.2.3	Empfehlungen zur Vorfiltration	42
<b>6.3</b>	<b>Betriebsparameter mit Einfluss auf die Verschmutzung</b>	<b>42</b>
6.3.1	Kontinuierlicher und diskontinuierlicher Abwasservolumenstrom	42
6.3.2	Strömungsgeschwindigkeit des Abwassers	42
<b>6.4</b>	<b>Desinfektion des Wärmetauschers</b>	<b>43</b>
<b>6.5</b>	<b>Automatische mechanische Wärmetauscherreinigung</b>	<b>44</b>
<b>6.6</b>	<b>Dimensionierung des Wärmetauschers</b>	<b>44</b>
<b>6.7</b>	<b>Folgerungen</b>	<b>44</b>
<b>7</b>	<b>REINIGUNG VON WÄRMETAUSCHERN</b>	<b>46</b>
<b>7.1</b>	<b>Übersicht der Reinigungsmethoden</b>	<b>46</b>
<b>7.2</b>	<b>Reinigung von Rohrbündelwärmetauschern</b>	<b>46</b>
7.2.1	Mechanische Reinigung	46
7.2.2	Druckspülung	47
7.2.3	Spülung mit Wasser	47
7.2.4	Chemische Spülung	47
7.2.5	Empfehlungen	48
<b>7.3</b>	<b>Reinigung von Plattenwärmetauschern</b>	<b>48</b>
7.3.1	Mechanische Reinigung	48
7.3.2	Chemische Spülung	48
7.3.3	Automatische Reinigung	49
7.3.4	Empfehlungen	49
<b>7.4</b>	<b>Reinigung von Rinnenwärmetauschern</b>	<b>50</b>
7.4.1	Mechanische Reinigung	50
7.4.2	Hochdruckspülung	50
7.4.3	Schwallspülung	50
7.4.4	Empfehlungen	50
<b>7.5</b>	<b>Auslösung der Reinigung</b>	<b>51</b>
7.5.1	Kriterien für die Wärmetauscherreinigung	51
7.5.2	Messtechnische Einrichtungen zur Planung der Reinigung	51
<b>8</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN</b>	<b>53</b>
<b>9</b>	<b>LITERATUR</b>	<b>54</b>

<b>ANHANG</b>	<b>56</b>
<b>10 ZUSÄTZLICHE EINFLUSSFAKTOREN DER ABWASSERENERGIENUTZUNG</b>	<b>56</b>
10.1 Grösse und Dynamik des Abwasservolumenstroms	56
10.2 Grösse und Dynamik der Abwassertemperatur	57
10.3 Begrenzungen für die Abwasserenergienutzung vor der Kläranlage	58
10.4 Begrenzungen der Abwasserenergienutzung bei Einleitungen in Gewässer	59
<b>11 VERWENDETE UNTERSUCHUNGSMETHODEN</b>	<b>59</b>
11.1 Messung der Temperatur	59
11.2 Messung des Durchflusses	60
11.3 Berechnung Wärmetauscherleistung und Wärmedurchgangskoeffizient	60
<b>12 NOMENKLATUR</b>	<b>61</b>
12.1 Verwendete Abkürzungen	61
12.2 Verwendete Symbole	61

## 1 Einleitung

Abwasser ist eine interessante, praktisch nutzbare und vor allem überall und auch in Zukunft ständig verfügbare sichere Energiequelle. Interessant ist Abwasser, weil es im Vergleich zu anderen Umweltenergien wie Luft, Erdwärme oder Flusswasser auch im Winter relativ hohe Temperaturen von 10 °C bis 20 °C aufweist. Die Nutzung von Abwasser als Energiequelle mittels Wärmetauscher und Wärmepumpe hat in der Schweiz vor mehr als 20 Jahren ihren Anfang genommen. Die Schweiz hatte auf diesem Gebiet eine echte Pionierrolle inne, aus der ein reicher Erfahrungsschatz in Bezug auf die Realisierung und den Betrieb von Anlagen zur Abwasserenergienutzung hervorgegangen ist. Heute produzieren in der Schweiz mehrere Hundert, kleinere und grössere Anlagen Energie aus Abwasser. Da im Grunde genommen jede Anlage ein Unikat darstellt, sind auch die gemachten Erfahrungen sehr vielfältig. Hier soll über ein Projekt berichtet werden, in dem die positiven wie negativen Erfahrungen evaluiert wurden, aus der Idee heraus, damit einen Beitrag für die erfolgreiche Planung und Verwirklichung künftiger Abwasserenergienutzungsanlagen zu leisten.

Bei der Realisierung des Projekts wurde so vorgegangen, dass zuerst unter Betreibern von Wärmenutzungsanlagen eine Erhebung der Anlage-, Betriebs- und Leistungsdaten durchgeführt wurde. Dann wurden auf ausgewählten Anlagen Messungen der Wärmetauscherverschmutzung und der daraus resultierenden Leistungseinbusse durchgeführt. Das Ziel dabei war, die Einflussgrössen zu identifizieren, die Auswirkungen haben auf die Verschmutzung von Wärmetauschern, und die Massnahmen zu evaluieren, mit denen das Problem der Wärmetauscherverschmutzung in der Praxis gelöst oder begrenzt werden kann. Im Projekt stand also das Abwasser und der Wärmetauscher, resp. dessen Verschmutzung und Leistung im Zentrum. Wärmepumpen waren nicht Gegenstand des Projekts, zum Einen weil heizungstechnische Fragen keine Domäne der Eawag sind, zum anderen weil auf diesem Gebiet viele ausgewiesene Fachleute tätig sind und heute ein umfassendes know how bereits vorhanden ist.

Die Abwasserenergienutzung kann ökonomisch interessant sein, aber in Zukunft werden vor allem ihre ökologischen Aspekte in den Vordergrund rücken: Die Einsparung fossiler Brennstoffe, die Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstosses und die Erschliessung nachhaltiger Energiequellen: Es ist einfach ökologisch sinnvoll die im Abwasser enthaltene Wärme nicht einfach in die Umwelt zu verpuffen, sondern sie noch ein zweites Mal zu nutzen, und nicht unsere Gewässer damit aufzuheizen.

## 2 Verfügbares Potenzial und untersuchte Anlagen in der Schweiz

### 2.1 Potenzial und Wirtschaftlichkeit

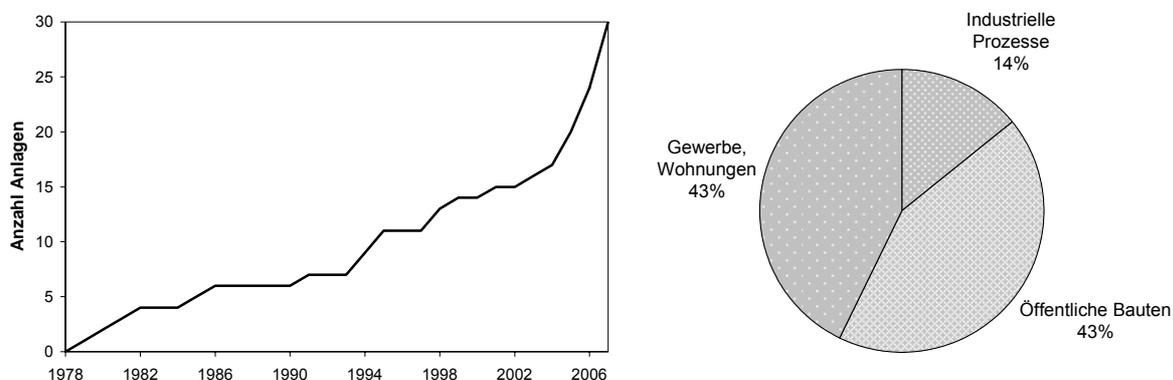
Das Potenzial an Abwasser in der Schweiz ist beachtlich: Täglich fallen ca. 5 Mio. m<sup>3</sup> Abwasser an. Wenn dieses Abwasser um ein Grad abgekühlt würde, entspräche dies einer Leistung von 300 Megawatt, was in etwa dem Wärmebedarf von 200'000 Einfamilienhäusern gleichkommt. Praktisch nutzbar ist aber nur ein Bruchteil dieser Energie, und es muss von Fall zu sorgfältig abgeklärt werden, wo Abwasserenergienutzung sinnvoll und wirtschaftlich betrieben werden kann. Die nutzbare Leistung ist proportional zum Volumenstrom und zur Veränderung der Temperatur des Abwassers [1]. Sie beträgt bei einer Abkühlung des Abwassers um beispielsweise 1 Kelvin und für einen Volumenstrom von 70 Liter pro Sekunde rund 300 kW (Gleichung 1 im Anhang 11.3). Es wird geschätzt, dass die Abwasserenergienutzung theoretisch ein Potenzial für die Beheizung von rund 10 % aller Gebäude hat, und dass dieses Potenzial praktisch für etwa 3 % aller Gebäude genutzt werden könnte.

In einer vom Bundesamt für Energie unterstützten Untersuchung zu Potenzialen und Wirtschaftlichkeit hat die Dr. Eicher + Pauli AG in Liestal solche Abschätzungen durchgeführt [2]. In dieser Studie wird eine GIS-Methode präsentiert zur Potenzialabschätzung an möglichen Standorten und die Wärmeegestehungskosten von Anlagen zur Abwasserenergienutzung werden mit denjenigen konventioneller Wärmeerzeugungsanlagen verglichen. Es werden Hemmnisse aufgezeigt, der Einfluss von Förderinstrumenten wird diskutiert und die technische und ökonomische Entwicklung auf der Anlagen- und der Nachfrageseite wird untersucht. Die Studie kommt zum Schluss, dass die Wirtschaftlichkeit der Abwasserenergienutzung massgeblich positiv beeinflusst wird durch

- eine hohe nachgefragte Energiedichte in der Nähe der Anlage,
- eine grosse Anlagenleistung, die im Megawattbereich liegt,
- eine grosse Betriebsstundenzahl der Wärmepumpe und
- tiefe Temperaturen auf der Abnehmerseite (ausser bei Nahwärmenetzen).

### 2.2 Umfrage unter Anlagenbetreibern

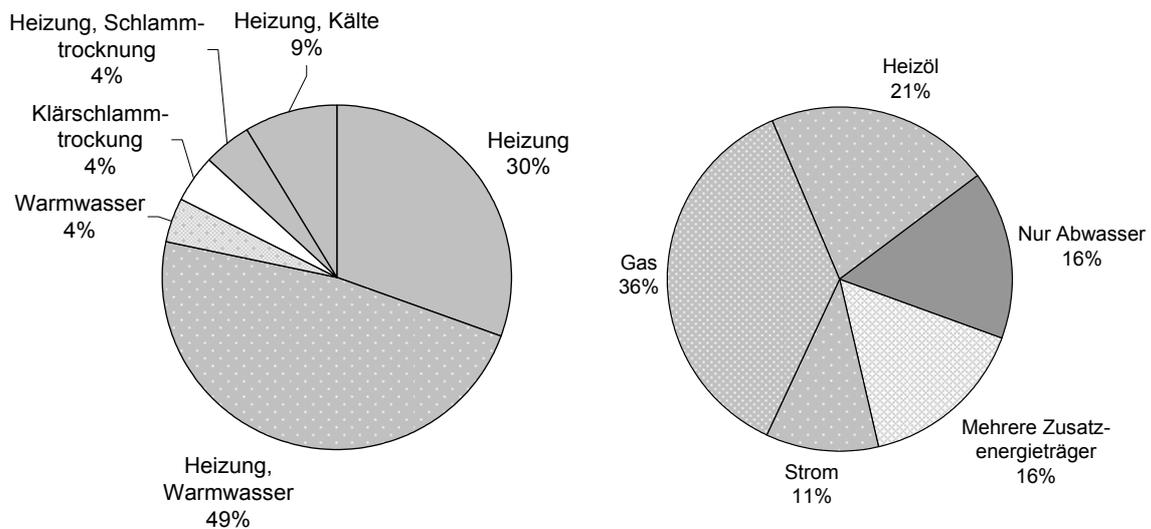
Im Jahr 2007 wurde in einer ersten Etappe des hier beschriebenen Projekts eine Erhebung der Anlage-, Betriebs- und Leistungsdaten von Wärmenutzungsanlagen durchgeführt, an der sich 30 Anlagenbetreiber beteiligten. Die Umfrage ergab, dass die Anzahl realisierter Anlagen in den letzten Jahren stark angestiegen ist (Abbildung 1).



**Abbildung 1:** Kumulierte Anzahl der mit einer Umfrage erfassten Anlagen (links) und Verteilung der Abnehmer der Abwasserwärme (rechts).

Die Abwasserwärme wird von unterschiedlichen Abnehmern (Abbildung 1) und für verschiedene Zwecke genutzt. Die Anlagen dienen vor allem der Gebäudeheizung, die bei der Hälfte der

Anlagen mit Warmwasseraufbereitung kombiniert ist. Andere Anlagen werden ausschliesslich zur Warmwasseraufbereitung verwendet, oder sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen, oder zur Klärschlamm-trocknung, zum Teil kombiniert mit Heizwärmenutzung (Abbildung 2). Fast alle Anlagen sind bivalent ausgelegt, d.h. sie verwenden neben Abwasser noch Heizöl, Gas oder Strom als zweiten Energieträger. Bivalente Anlagen können ökonomischer betrieben werden, weil die Wärmepumpe bedeutend längere Laufzeiten erreicht, wenn zur Deckung des Spitzenbedarfs ein zusätzlicher Energieträger zur Verfügung steht.

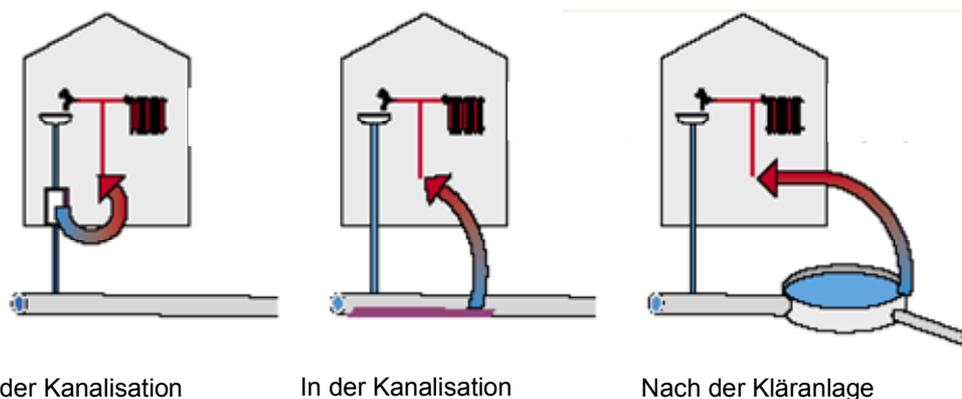


**Abbildung 2:** Verteilung der Nutzungszwecke (links) und der verwendeten Zusatzenergieträger (rechts) auf den mit einer Umfrage erfassten Abwasserenergienutzungsanlagen.

Die vollständigen Umfragedaten wurden in einem ersten Bericht zusammengefasst [3]. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass neben den mit der Umfrage erfassten Anlagen in der Schweiz noch eine ganze Reihe weiterer Anlagen zur Abwasserenergienutzung betrieben werden. Die Zahl der mittleren bis grossen Anlagen wird heute auf ca. 50 bis 60 geschätzt, die Zahl der meist kleineren, sog. „in-house“-Anlagen auf etwa 200.

### 2.3 Nutzungsort, Wärmetauschertyp und Anlagenkonfiguration

Die Abwasserenergie kann bereits im Gebäude vor der Abgabe in die Kanalisation, in der Kanalisation selber oder erst im Ablauf der Kläranlage genutzt werden (Abbildung 3).



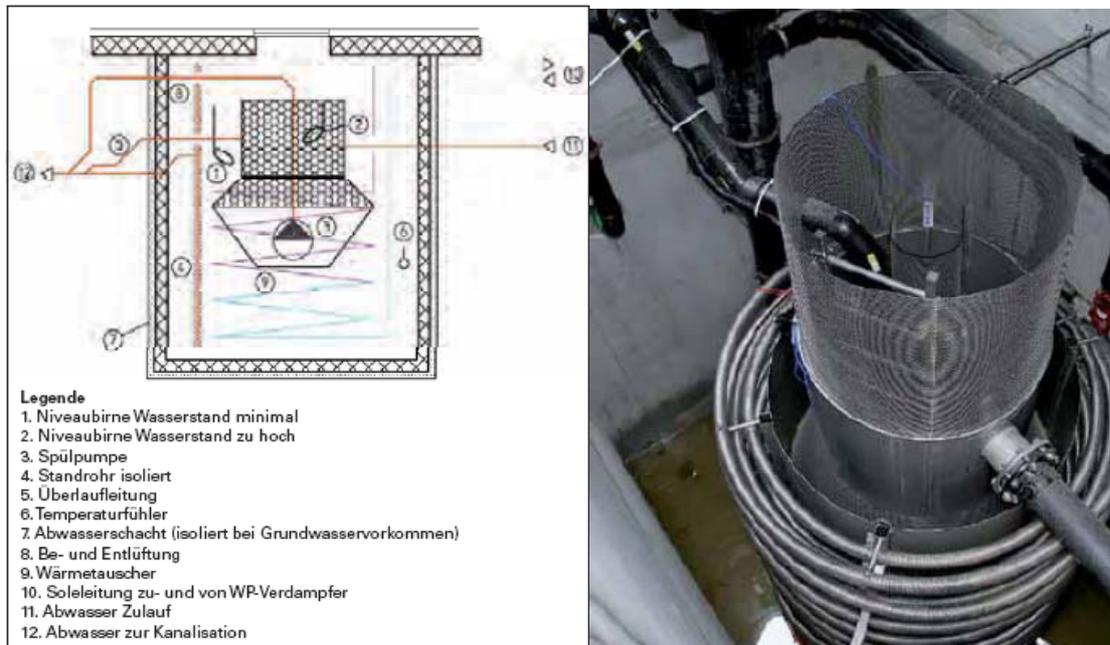
**Abbildung 3:** Abwasserenergienutzung ist im Gebäude, in der Kanalisation oder nach der Kläranlage möglich.

### 2.3.1 Abwasserenergienutzung im Gebäude

Die Nutzung der Abwasserenergie im Gebäude ist nur für grosse Überbauungen, Spitäler, Bäder, Industrien usw., eine wirtschaftliche Lösung. Sie hat den Vorteil, dass hier die Abwassertemperaturen am höchsten sind. Die Anlagen werden sinnvollerweise so ausgelegt, dass das Abwasser in ein Becken eingeleitet wird, in dem es für einige Zeit verweilt. Die Wärmepumpe wird eingeschaltet, wenn die Abwassertemperatur im Becken hoch ist, und entnimmt dem Abwasser Wärme, mit der ein Warmwasserspeicher aufgeladen werden kann. Der ökologische Aspekt dabei ist das Energierecycling, dank dem die Energie aus dem im Gebäude produzierten Warmwasser noch ein zweites Mal verwendet werden kann.

Richtwert für die wirtschaftliche Nutzung der Abwasserenergie im Gebäude ist eine Abwassermenge von mindestens 8'000 bis 10'000 Liter pro Tag. Da pro Person und Tag im Durchschnitt mit einem Wasserverbrauch (Kalt- und Warmwasser) von ca. 150 Liter gerechnet werden kann, werden also mindestens 60 Personen benötigt, was etwa 25 bis 30 bewohnten Wohnungen entspricht. Für das von ihnen produzierte häusliche Abwasser kann mit einer durchschnittlichen Temperatur von ca. 23 °C gerechnet werden.

Ein Beispiel für diese Art der Abwasserwärmenutzung ist die in der Null-Energie-Siedlung „Eulachhof“ in Winterthur mit 132 Mietwohnungen von der FEKA-Energiesysteme AG installierte Anlage. Das gesammelte Abwasser aus den Nasszellen dient als Wärmequelle für eine spezielle Abwasserwärmepumpe, mit der Warmwasser auf 60 °C aufgewärmt und der Warmwasserbedarf zu 100% gedeckt werden kann. Herzstück der Anlage ist das sogenannte FEKA-Modul, eine Kombination aus Wärmetauscher und Filtereinheit (Abbildung 4). Der eigentliche Abfluss erfolgt über ein kommunizierendes Standrohr und eine integrierte Pumpe dient zur Rückspülung. Der Wärmetauscher besteht aus einem speziellen Wellrohr, welches auch bei Verschmutzung einen guten Wärmeübergang gewährleistet.



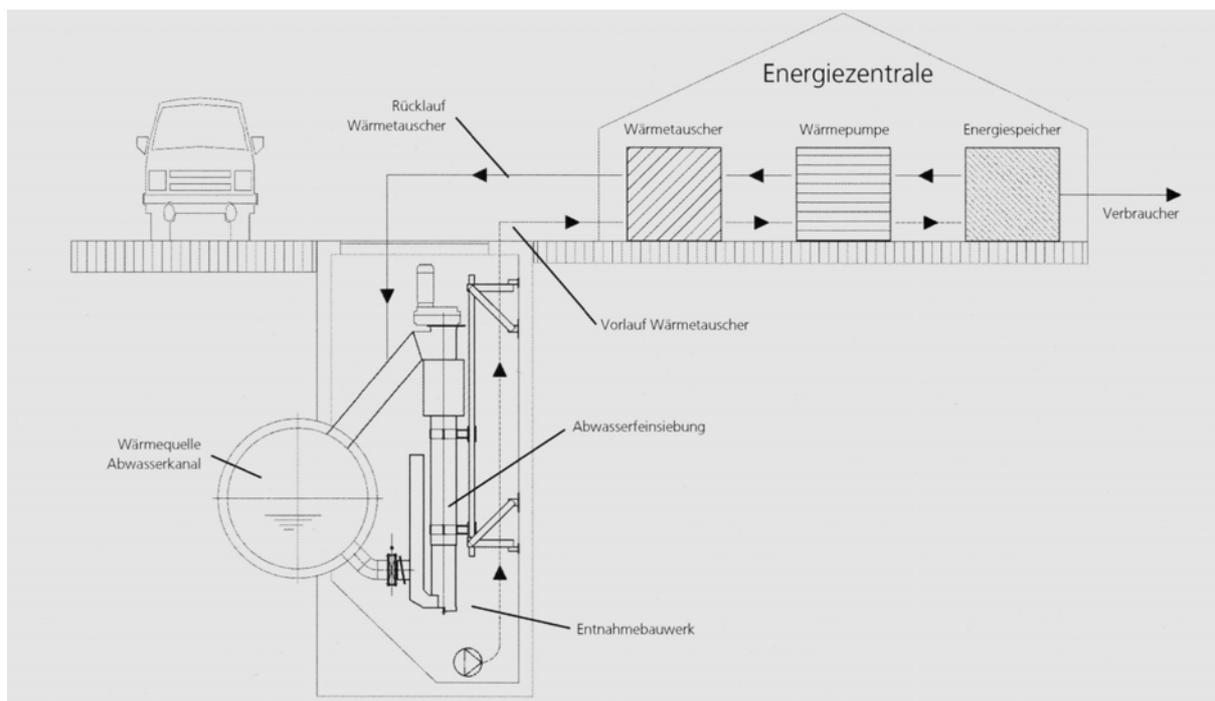
**Abbildung 4:** Funktionsprinzip des FEKA-Moduls (links) und Ansicht des Wärmetauschers (rechts) im Eulachhof in Winterthur [4].

### 2.3.2 Abwasserenergienutzung in der Kanalisation

Die Nutzung in der Kanalisation wird realisiert indem ein Rinnenwärmetauscher in ein Kanalisationsrohr eingebaut wird (Abbildung 5) oder Abwasser aus der Kanalisation abgepumpt, über einen Wärmetauscher geleitet und dann wieder in die Kanalisation zurückgeführt wird (Abbildung 6). Sie ist möglich ab einem Abwasseranfall von zehn Litern pro Sekunde, entsprechend etwa 5000 Einwohnerequivalenten, und hat den Vorteil, dass die Distanz zu den Nutzern der Abwasserenergie meistens klein ist. Wegen möglicher negativer Auswirkungen auf den Betrieb einer nachfolgenden Kläranlage ist die Wärmemenge begrenzt, die dem Rohabwasser entnommen werden kann (siehe Anhang Abschnitt 10.3).



**Abbildung 5:** Rinnenwärmetauscher werden in bestehende Kanalisationsrohre eingebaut (links) oder werden bereits bei der Fertigung in diese integriert (rechts).



**Abbildung 6:** Schematische Darstellung des HUBER ThermWin® Konzepts zur Wärmerückgewinnung aus Rohabwasser [5].

Der Einbau von Rinnenwärmetauschern ist für die unterschiedlichsten Querschnittsgeometrien möglich, setzt aber einen minimalen Innendurchmesser des Kanals von 80 cm und, je nach Grösse der Anlage, einen geraden Kanalisationsabschnitt von 20 - 200 Metern Länge voraus. Beim Abpumpen des Abwassers kann der Wärmetauscher ausserhalb der Kanalisation, und damit leichter zugänglich aufgestellt werden, das Rohabwasser muss aber vor dem Wärmetauscher gesiebt werden (siehe Abschnitt 6.2.2).

Ein sehr interessantes Beispiel für die Abwasserenergienutzung in der Kanalisation ist die Rinnentauscheranlage, die der Klimatisierung der Räume der Uhrenfabrik IWC in Schaffhausen dient. Diese 2005 gebaute Anlage kann mit einer Rinnentauscherfläche von 42 m<sup>2</sup> wechselweise oder sogar gleichzeitig Wärme und Kälte produzieren mit einer Spitzenleistung des Wärmetauschers von 80 kW resp. 260 kW [6].

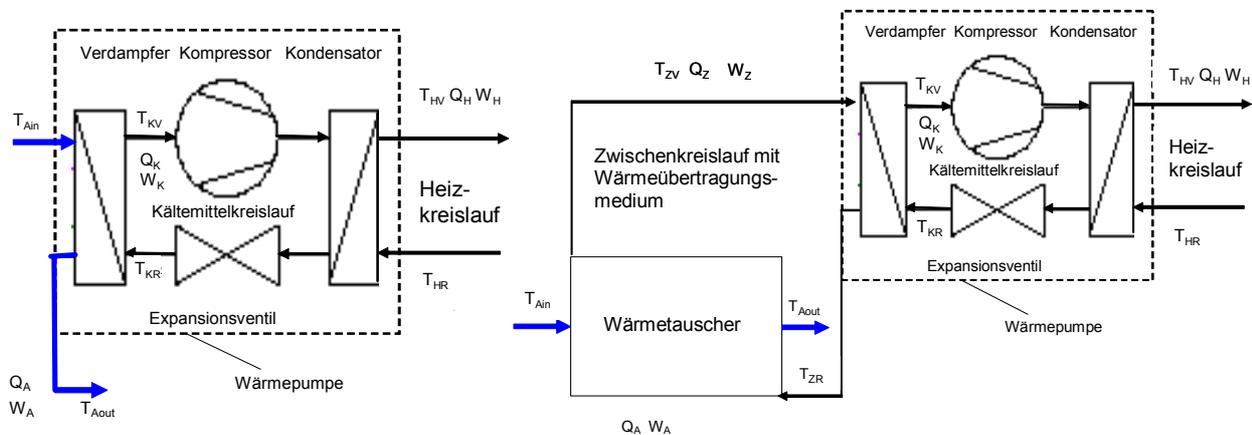
### **2.3.3 Abwasserenergienutzung nach der Kläranlage**

Zur Nutzung der Abwasserenergie wird das gereinigte Abwasser ganz oder teilweise über einen Platten- oder Rohrbündeltauscher geleitet. Die Nutzung im Ablauf der Kläranlage hat verschiedene Vorteile: Die Einschränkungen bzgl. der Veränderung der Abwassertemperatur sind hier kleiner als im Zulauf der Kläranlage (siehe Anhang Abschnitt 10.4) und je sauberer das gereinigte Abwasser ist, desto geringer ist die Verschmutzung des Wärmetauschers. Mancherorts wird die Wärmeenergie direkt auf der Kläranlage genutzt, sei es zur Gebäudeheizung oder zur Klärschlamm-trocknung. Wie das folgende Beispiel zeigt, kann die Abwasserenergie über eine Fernwärmeleitung aber auch Nutzern verfügbar gemacht werden, die weiter von der Kläranlage entfernt sind [7].

Ein Teil des Abwassers aus der Kläranlage Werdhölzli in Zürich wird über eine 1,5 km lange Rohrleitung in den Energieverbund Schlieren eingespeist. Dieser vom Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz) als Contractor realisierte Energieverbund versorgt heute das Postzentrum Mülligen mit Wärme- und Kälteenergie und soll in Zukunft noch erweitert werden. Im Endausbau soll die Jahresproduktion von Wärme 52'000 MWh betragen, mit einem Anteil an der Wärmeproduktion der Abwasserwärmepumpe von 60%, der Abwärme der Kältemaschine von 20% und des Erdgas-Heizkessels von 20%. Die Jahresproduktion von Kälte soll 16'700 MWh betragen, mit einem Anteil des Abwassers von 92% und der Aussenluft von 8% an der Kühlleistung. Heute beträgt die Energieproduktion bereits rund die Hälfte der für den Endausbau geplanten Werte [8].

### 2.3.4 Anlagenkonfiguration

Die Anlagen können so ausgelegt werden, dass Energie direkt zwischen dem Abwasser und dem Kältemittelkreislauf ausgetauscht wird, oder so, dass der Austausch über einen Zwischenkreislauf erfolgt, über den die Energie dann von der Wärmepumpe an den Heizkreislauf abgegeben wird (Abbildung 7). Die Konfiguration ohne Zwischenkreislauf ist apparativ einfacher und energetisch etwas günstiger, ist aber empfindlicher auf Veränderungen der Abwassereigenschaften, die zu Vereisungen oder Verschmutzung des Wärmetauschers führen können. Zudem werden grössere Kältemittelfüllmengen benötigt. An einigen Orten gibt es behördliche Bestimmungen, die aus Gründen des Gewässerschutzes einen Zwischenkreislauf vorschreiben. Dieser hat den Vorteil, dass die Verdampfungstemperatur unter  $0\text{ °C}$  absinken darf, falls dem Zwischenkreislauf ein Frostschutzmittel beigegeben werden kann.



**Abbildung 7:** Temperaturen, Energie- und Volumenströme in Abwasserenergienutzungsanlagen mit (rechts) und ohne (links) Zwischenkreislauf (Bedeutung der verwendeten Symbole: Siehe Kap. 12 im Anhang).

### **3 Vorgehen bei der Planung und Realisierung von Projekten**

Für die Nutzung der Abwasserenergie werden Kompetenz und Fachwissen auf mehreren Gebieten benötigt. Voraussetzung für die erfolgreiche Realisierung ist daher eine sorgfältige Planung. Es gibt heute eine ganze Reihe von Planungshilfen, wie Leitfäden und Ratgeber für Planer, Bauherrschaften und Gemeinden [9,10,11] und für Inhaber und Betreiber von Abwasserreinigungsanlagen und Kanalisationen [12]. Es gibt die Beratungsstelle „EnergieSchweiz für Infrastrukturanlagen“ des Bundesamtes für Energie, sowie erfahrene Contractors wie das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz) oder die Elektra Birseck in Münchenstein (ebm), die Anlagen zur Abwasserenergienutzung planen, realisieren und betreiben. Deshalb werden hier nur selektiv einige der für die Planung wichtigen Aspekte aufgeführt.

#### **3.1 Abwassertechnische Voraussetzungen**

Der Volumenstrom und die Temperatur des Abwassers weisen einen charakteristischen Tagesgang und saisonale Schwankungen auf, die von den jeweiligen örtlichen Gegebenheiten wie der Grösse des Einzugsgebiets, sowie den Anteilen von Fremdwasser, kommunalem und industriellem Abwasser abhängen (siehe Anhang 10.1 und 10.2). Wegen des direkten Zusammenhangs zwischen Volumenstrom, Temperatur und nutzbarer Energie des Abwassers müssen Daten über die Variabilität dieser Grössen, aber auch über absehbare Veränderungen im Einzugsgebiet, erhoben oder bei Kläranlagen- und Kanalisationsbetreibern nachgefragt werden. Daneben ist auch die Qualität des Abwassers von Bedeutung wegen ihres Einflusses auf die Wärmetauscherverschmutzung (Kap. 4).

#### **3.2 Notwendige Bewilligungen und Vereinbarungen**

Im Gewässerschutzgesetz [13], in der Gewässerschutzverordnung [14] und teilweise auch in zusätzlichen kantonalen Bestimmungen [15,16] wird die Einleitung von Abwasser und Energie in die Kanalisation und die Vorfluter und deren Entnahme daraus geregelt (siehe Anhang 10.3 und 10.4). Daher ist für die Abwasserenergienutzung eine gewässerschutzrechtliche Bewilligung nötig, sowie zwischen dem Nutzer und den Inhabern der Kläranlage und der Kanalisation eine Nutzungsvereinbarung, in der sämtliche Pflichten und Kompetenzen im Zusammenhang mit dem Bau, Betrieb und Unterhalt einer Anlage zur Abwasserenergienutzung aufgeführt werden. Im Weiteren muss für Einbauten in Abwasserkanälen und Gewässern, sowie für die Erstellung von Fernleitungen, eine Baubewilligung eingeholt werden [11].

## 4 Abwasser als Ursache der Wärmetauscherverschmutzung

### 4.1 Übersicht

Unter dem Begriff „Abwasser“ versteht man im Allgemeinen kommunales Abwasser, also Wasser, das vor allem aus Haushalten in die Kanalisation gelangt. Je nach der Struktur des Siedlungsgebiets enthält kommunales Abwasser aber auch mehr oder weniger grosse Anteile an Fremdwasser aus Bächen, die über die Kanalisation entwässert werden, und an Abwässern aus Gewerbe oder Industrie. Die Abwässer können Stoffe beinhalten, welche die Wärmetauscher stark verschmutzen und so zu einem Problem werden können.

### 4.2 Abwasserinhaltsstoffe

#### 4.2.1 Rohabwasser

Rohabwasser, also das ungereinigte Abwasser, das in der Kanalisation zur Kläranlage fliesst, ist sehr reich an Nährstoffen, wenn es sich um kommunales Abwasser handelt (Tabelle 1). Über Fremdwasser können Feststoffe wie Sand, Kies und Blätter ins Rohabwasser gelangen, vor allem bei Abschwemmungen nach starken Niederschlägen. Von Industrie und Gewerbe werden heute Massnahmen verlangt, die verhindern, dass problematische Stoffe (z.B. Öle und Fette) ins Abwasser eingetragen werden.

**Tabelle 1:** Typische Konzentrationen von schweizerischem kommunalem Abwasser [17]

Inhaltsstoffe	Abkürzung	Einheit	ungereinigt	gereinigt
Gesamte organische Stoffe	CSB	$\text{g m}^{-3}$	350	20-30
Biologisch abbaubare org. Stoffe	BSB <sub>5</sub>	$\text{g m}^{-3}$	170	2-5
Gesamte ungelöste Stoffe	GUS	$\text{g m}^{-3}$	200	10
Organisch gebundener Stickstoff	TKN	$\text{g m}^{-3}$	30	1-3
Gesamter organischer Phosphor	P <sub>tot</sub>	$\text{g m}^{-3}$	5	0,3-0,8

#### 4.2.2 Gereinigtes Abwasser

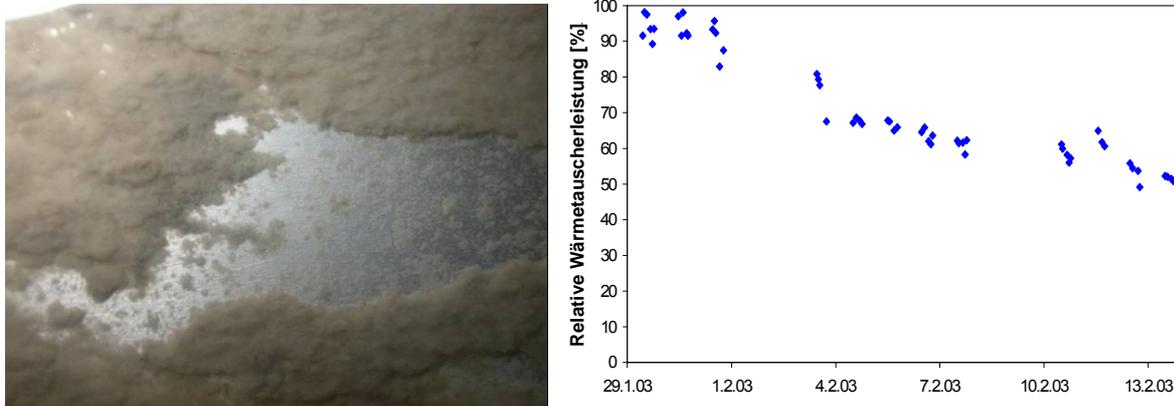
In der Kläranlage wird ein Grossteil der Inhaltsstoffe aus dem Abwasser entfernt. Tabelle 1 gibt typische Konzentrationen für die Wasserinhaltsstoffe im Ablauf der Kläranlage an. Im gereinigten Abwasser liegen die Konzentrationen also um Grössenordnungen tiefer als im Rohabwasser. Sie sind abhängig von der Belastung und dem Ausbaustand der Kläranlage. Wenn die Kläranlage über keine 4. Verfahrensstufe (Filtration) verfügt, durch welche die ungelösten Stoffe aus dem Abwasser entfernt werden, können über das Nachklärbecken auch ins gereinigte Abwasser wieder Feststoffe gelangen. Diese, und die in kleinen Konzentrationen noch immer vorhandenen Nährstoffe, können unter Umständen auch auf Wärmetauschern, die mit gereinigtem Abwasser beschickt werden, eine spürbare Verschmutzung verursachen.

### 4.3 Abwasserinhaltsstoffe führen zur Verschmutzung des Wärmetauschers

#### 4.3.1 Biofilmbildung

Mikroorganismen verwenden die im Abwasser enthaltenen Nährstoffe für ihr Wachstum und ihren Energiehaushalt. Sie siedeln sich in einem wässrigen Medium auf jeder festen Oberfläche an, also auch auf einem Wärmetauscher. Dazu produzieren sie auf ihrer Aussenhaut fadenförmige Moleküle, mit denen sie sich auf der Oberfläche verankern, und die ein netzartiges Geflecht bilden, eine sog. Biofilmmatrix. Sind im Wasser genügend Nährstoffe vorhanden, können die Mikroorganismenkolonien mehrere Millimeter dicke Biofilme bilden. Biofilme können den

Wärmedurchgang vom Abwasser in den Wärmetauscher, und damit dessen Leistung merklich verringern (Abbildung 8).



**Abbildung 8:** Biofilmbildung auf einem Wärmetauscher (links) und dessen Leistungsabnahme (rechts) infolge der Verschmutzung [18].

### 4.3.2 Ablagerung von Feststoffen

Ausfällungen und Ablagerungen von Feststoffen, also rein chemische-physikalische Prozesse, können ebenfalls zu Belägen auf der Oberfläche der Wärmetauscher führen. In der Praxis setzen sich die Beläge aber meistens aus einem Gemisch von Mikroorganismen und Feststoffen zusammen.

### 4.3.3 Zeitlicher Ablauf der Verschmutzung

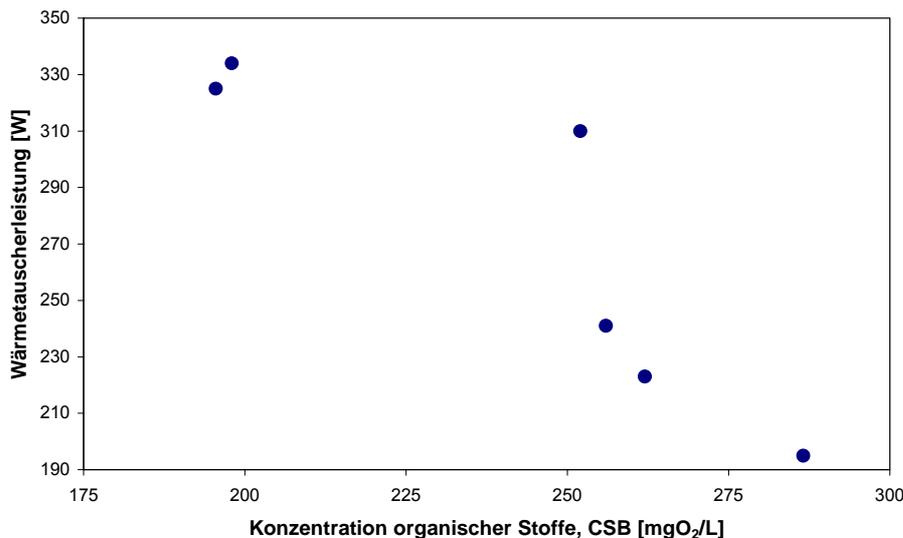
In der Kanalisation wird die Bildung der Beläge, die dort als Sielhaut bezeichnet werden, aber nicht nur von den Abwasserinhaltsstoffen, sondern auch stark vom Abflussregime beeinflusst. In Trockenwetterperioden mit geringem Abfluss ist die Schleppekraft des Wassers klein und die Feststoffe sedimentieren an die Kanalsole. Bei einem Starkregen werden sie wieder aufgewirbelt und vom Wasser weggetragen. In welchem Ausmass sich eine Sielhaut aufbauen und die Leistung eines Rinnentauschers in der Kanalisation beeinträchtigen kann, hängt im Einzelfall vom lokalen Sohlgefälle, sowie von der lokalen Fließgeschwindigkeit und den Inhaltsstoffen des Abwassers ab.

Röhren- und Plattentauscher werden kontinuierlich oder diskontinuierlich mit filtriertem oder unfiltriertem gereinigtem Abwasser beschickt. Hier läuft die Verschmutzung des Wärmetauschers so ab, dass zuerst einzelne Mikroorganismen die Oberfläche besiedeln, dann wachsen und eine Biofilmmatrix bilden, die wie ein Sieb wirkt, in dem sich feine organische und anorganische Feststoffe fangen. Eine solche Matrix kann sich innert weniger Wochen aufbauen, ist mechanisch sehr stabil und löst sich in den seltensten Fällen wieder von selber von der Oberfläche ab. Die Verschmutzung kann bei Wärmetauschern mit sehr kleinen Durchflussquerschnitten zu einer kompletten Verstopfung führen.

## 4.4 Beobachtungen und Untersuchungen in der Praxis

Die beschriebenen Zusammenhänge zwischen der Verschmutzung der Wärmetauscher und den verschiedenen Inhaltsstoffen des Abwassers werden auch in der Praxis festgestellt. In der durchgeführten Umfrage werden von zehn Anlagenbetreibern als Ursache der Verschmutzung Biofilme angegeben, von drei Betreibern Feststoffe und von je einem Fett und Kalk. Dabei sind folgende Beobachtungen gemacht worden:

- Die Verschmutzung eines Rinnentauschers ging merklich zurück, als ein Industriebetrieb, der das Abwasser stark mit organischen Stoffen belastete, seinen Betrieb einstellte. Dasselbe resultierte auf einer anderen Anlage, als der Wärmetauscher nicht mehr mit Abwasser, sondern mit Kühlwasser aus einem Industriebetrieb beschickt wurde. Die Abnahme der Wärmetauscherleistung in Abhängigkeit von der Konzentration organischer Stoffe im Abwasser ist in eigenen Untersuchungen ebenfalls beobachtet worden (Abbildung 9).



**Abbildung 9:** Wärmetauscherleistung in Abhängigkeit von der Konzentration organischer Stoffe (CSB), gemessen in einer mit vorgeklärtem Abwasser beschickten Rinne [18].

- Nach dem Ausbau der Kläranlage mit einer 4. Verfahrensstufe (Filtration) nahm die Verschmutzung in einem mit gereinigtem Abwasser beschickten Wärmetauscher stark ab.
- In zwei Fällen wird eine erhöhte Verschmutzung festgestellt, wenn saisonale Einleitungen von nährstoffhaltigem Industrieabwasser oder starke Niederschläge die Kläranlage überlasten.
- Laut den meisten Anlagenbetreibern kommt der Vorfiltration eine grosse Bedeutung zu (Abschnitt 6.2.1): Anlagen mit Bernoullifilter arbeiten in der Regel zufrieden stellend. Einfache Siebfilter zeigen ebenfalls eine gute Wirkung, verstopfen aber offenbar so schnell, dass sie auf mehreren Anlagen wieder ausgebaut wurden. Dies führte dann wiederum zu einer Zunahme der Wärmetauscherverschmutzung. Nur in einer Anlage zeitigten Versuche mit einem Vorfilter keine positiven Ergebnisse.
- Auf zwei Rinnentauschern in der Kanalisation reduzieren Ablagerungen von Sand und Kies den Wärmeübergang spürbar und müssen durch Absaugen, resp. Hochdruckspülung entfernt werden.

#### 4.5 Folgerungen

- Die Konzentration der verschiedenen Inhaltsstoffe des Abwassers ist der dominierende Faktor für das Ausmass der Verschmutzung der Wärmetauscher.
- Dicke Schmutzschichten entstehen, weil sich Mikroorganismen auf der Wärmetauscheroberfläche ansiedeln und eine Biofilmmatrix bilden, in die organische und anorganische Partikel eingelagert werden. Die Schmutzschichten können aber auch aus rein anorganischem Material bestehen, wie Kalk oder Sand und Kies auf Rinnenwärmetauschern.
- Die Verschmutzung lässt sich nicht aus Messungen der Abwasserinhaltsstoffe vorhersagen, weil die Abwasserzusammensetzung zeitlich stark variieren kann und die Verschmutzung

auch noch von anderen Faktoren beeinflusst wird, wie dem Durchfluss- oder Abflussregime und der Geometrie der Wärmetauscher.

- Da das Ausmass der Verschmutzung nicht vorherzusagen ist, sollten bereits bei der Planung von Anlagen zur Abwasserenergienutzung Überlegungen angestellt werden, wie allfällig auftretende Verschmutzungsprobleme gelöst oder begrenzt werden könnten (Kap 7).

## 5 Wärmetauscherverschmutzung und ihre Auswirkungen

Je nach Anlagenkonfiguration und Wärmetauschertyp kann die Verschmutzung des Wärmetauschers einen mehr oder weniger grossen Einfluss auf den Betrieb einer Anlage zur Abwasserenergienutzung haben. In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der durchgeführten Messungen und die Aussagen der Betreiber zur Wärmetauscherverschmutzung auf den untersuchten Anlagen zusammengestellt. Die Verschmutzungsproblematik und das zur messtechnischen Erfassung der Verschmutzung angewandte Vorgehen werden im Abschnitt 5.1.2 am Beispiel der Anlage RB1 im Detail erläutert.

### 5.1 Rohrbündeltauscher

#### 5.1.1 Übersicht der untersuchten Anlagen

Die Untersuchung der mit Rohrbündeltauschern (RB) betriebenen Anlagen hat gezeigt, dass die Wasserführung im Wärmetauscher und das Vorhandensein einer Vorreinigung wichtige Grössen für die Verschmutzung dieses Anlagentyps sind. In Tabelle 2 ist für 9 Anlagen mit Rohrbündeltauschern die Abwasserführung innerhalb oder ausserhalb der Rohrbündel, die Art und das Intervall der Wärmetauscherreinigung, sowie das Vorhandensein eines Vorfilters und dessen Reinigungsintervall aufgelistet. Da alle diese Anlagen mit gereinigtem Abwasser betrieben werden, ist auch das Vorhandensein einer 4. Stufe (Filtration) auf der Kläranlage erfasst worden.

**Tabelle 2:** Untersuchte Anlagen mit Rohrbündeltauschern

Anlage	Rohrbündelwärmetauscher			Abwasser		4. Stufe ARA
	Subtyp	Reinigungsart	Reinigungsintervall	Vorfilter	Reinigungsintervall	
RB1	innen	Druckspülung	3-4 x pro Jahr	-	n.a.	ja
RB2	innen	keine	noch nie in 2 Jahren	-	n.a.	nein
RB3	innen	keine	noch nie in 2 Jahren	Siebfilter	1-2 x pro Jahr	ja
RB4	innen	mechanisch	1 x pro Monat	Siebfilter	1 x pro Monat	nein
RB5	innen	Spülen	1 x pro 2 Jahre	Siebfilter	1 x pro 2 Jahre	nein
RB6	aussen	chemisch	1 x pro Jahr	-	n.a.	ja
RB7	aussen	chemisch	1 x pro 2 Jahre	-	n.a.	ja
RB8	aussen	keine	noch nie in 2 Jahren	Beutelfilter	1 x pro Monat	nein
RB9	innen	chemisch	1 x pro 2 Jahre	Quarzsandfilter	automatisch	nein

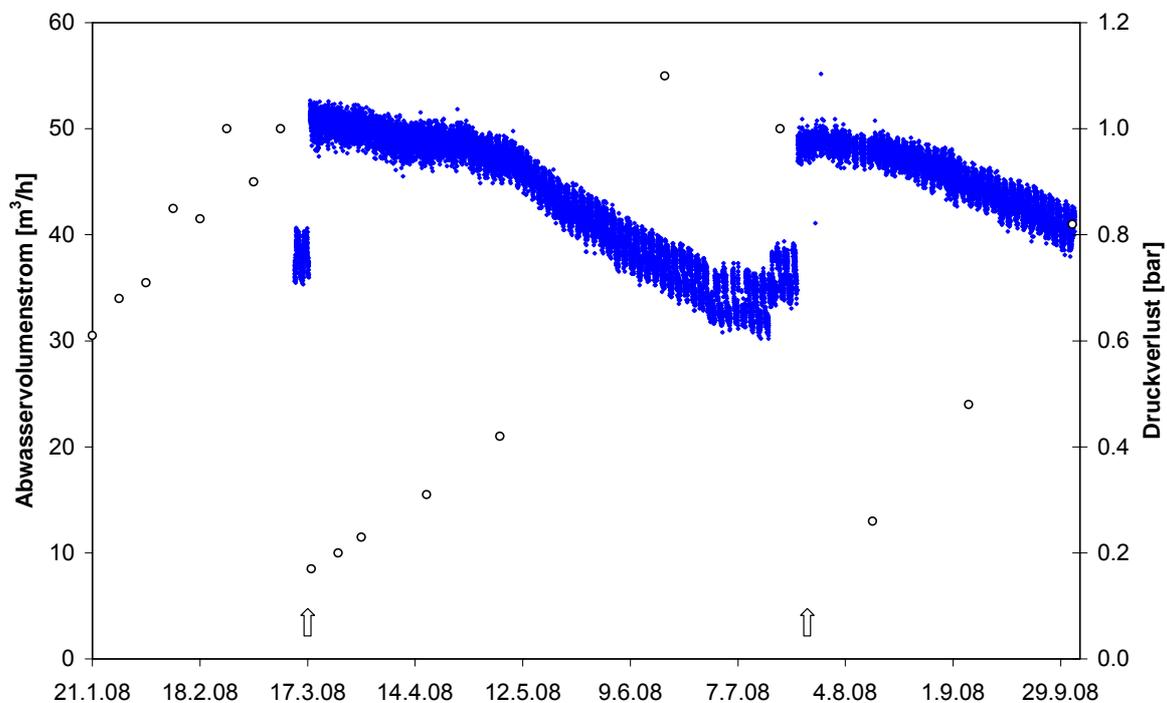
Auf den Anlagen RB1 und RB2 wurden eigene Messungen durchgeführt.

#### 5.1.2 Anlage RB1

Die Anlage RB1 ist eine der ältesten ihrer Art in der Schweiz und entzieht dem gereinigten Abwasser der Kläranlage in Zumikon bereits seit 30 Jahren Wärme, die zur Gebäudeheizung, Hallenbadheizung und Speisung eines Wärmeverbunds verwendet wird. Das geklärte Abwasser wird über eine Druckleitung und ohne Vorfiltration durch den Wärmetauscher gepumpt. Die Anlage hat einen Zwischenkreislauf, der mit Glykol versetzt ist, um einer Vereisung entgegen zu wirken. Die Wärmepumpe besteht aus vier baugleichen Kompressoren, welche abhängig vom Wärmebedarf in Betrieb genommen werden.

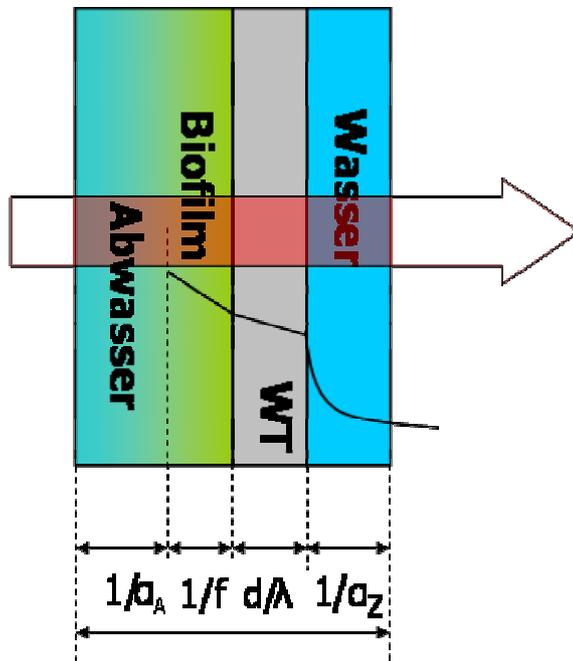
Zur quantitativen Erfassung von Ausmass und zeitlicher Entwicklung der Verschmutzung des Wärmetauschers wurden der Abwasservolumenstrom, die Abwassertemperatur im Zu- und Ablauf des Wärmetauschers, sowie die Vorlauf- und Rücklauf-temperatur im Zwischenkreislauf nach den im Kap. 11 beschriebenen Methoden gemessen. Zudem wird auf der Anlage der Druckverlust über den Wärmetauscher gemessen.

Abbildung 10 zeigt wie sich die Verschmutzung auf den Abwasservolumenstrom und den Druckverlust auswirkt. Durch die am 17. März erfolgte Reinigung des Wärmetauschers stieg der Volumenstrom von ca. 38 m<sup>3</sup>/h auf 50 m<sup>3</sup>/h an und der Druckverlust reduzierte sich von ca. 1 bar auf 0,2 bar. In den darauf folgenden vier Monaten bis zur erneuten Reinigung am 22. Juli fiel der Volumenstrom wieder kontinuierlich auf ca. 35 m<sup>3</sup>/h ab und der Druckverlust erhöhte sich erneut auf 1 bar. Der Druckverlust dient auf dieser Anlage als Indikator für die Fälligkeit der Wärmetauscherreinigung.



**Abbildung 10:** Effekt der Wärmetauscherverschmutzung und -reinigung (Pfeile) auf den Abwasservolumenstrom (Rauten) und den Druckverlust (Kreise) im Wärmetauscher.

Die Leistung  $W_{WT}$  des Wärmetauschers ist proportional zum Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$  und zur Temperaturdifferenz  $\Delta T_{WT}$  zwischen dem Abwasser und dem im Zwischen- oder Kühlkreislauf zirkulierenden Medium (Abbildung 11). Der Koeffizient  $k$  ist bestimmt durch vier Terme, die interpretiert werden können als Widerstände für den Wärmedurchgang durch die Wärmetauscherwand, durch die Schmutzschicht (Biofilm) und durch die Grenzschichten in den strömenden Medien. Die Gleichungen zur Berechnung von  $\Delta T_{WT}$  und  $k$  aus den gemessenen Temperaturen und dem Abwasservolumenstrom sind im Anhang 11.3 gegeben. Mit zunehmender Verschmutzung steigt der Widerstand und der Wärmedurchgangskoeffizient wird kleiner (Abbildung 12). So fällt der Wert des Koeffizienten für den sauberen Wärmetauscher,  $k_0 = 1200 \text{ W/m}^2/\text{K}$ , im Verlauf von sechs Wochen auf  $k = 600 \text{ W/m}^2/\text{K}$ . Aus  $k$  und  $k_0$  wird der fouling factor berechnet zu  $f = 1200 \text{ W/m}^2/\text{K}$  (Gleichung 9). Der Gesamtwiderstand für den Wärmedurchgang im verschmutzten Wärmetauscher,  $1/k = 16,6 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$ , resultiert in diesem Fall also je zur Hälfte aus dem Widerstand im sauberen Wärmetauscher ( $1/k_0 = 8,3 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$ ) und aus dem Widerstand der Schmutzschicht ( $1/f = 8,3 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$ ).



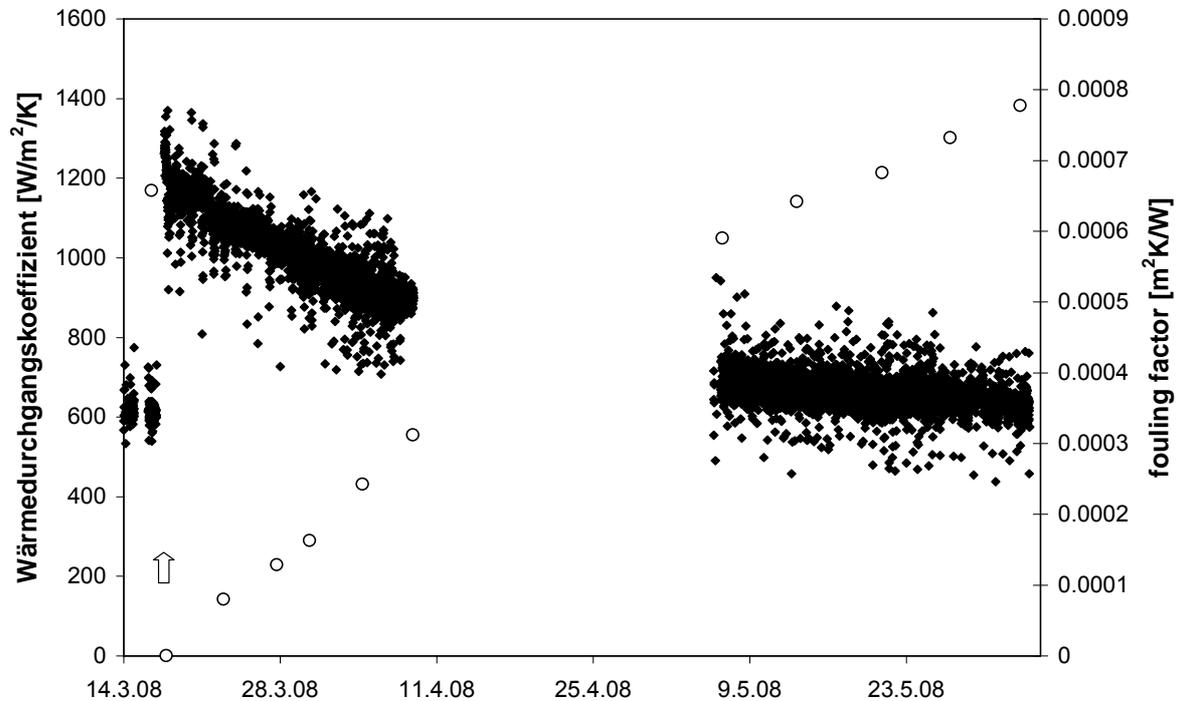
$$W_{WT} = k A_{WT} \Delta T_{WT}$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{a_A} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{a_Z} + \frac{1}{f}}$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_0} + \frac{1}{f}$$

**Abbildung 11:** Schematische Darstellung des Wärmeaustauschs zwischen dem Abwasser und dem im Zwischen- oder Kühlkreislauf zirkulierenden Medium und Berechnung der Wärmetauscherleistung  $W_{WT}$  und des Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$  gemäss den Gleichungen im Anhang 11.3.

Aus Abbildung 12 ist ersichtlich, dass die Veränderung des fouling factors in den ersten Wochen am Grössten ist und später abflacht, wohingegen die Veränderung von Abwasservolumenstrom und Druckverlust nach zwei Monaten deutlich zunimmt (Abbildung 10). Interessant ist, dass die Leistung des Wärmetauschers über die ganze Untersuchungsperiode hinweg praktisch konstant war, trotz der signifikanten Zunahme der Verschmutzung. Die Erklärung ist, dass die Abnahme von  $k$  durch eine Zunahme von  $\Delta T_{WT}$  kompensiert wurde (Gleichung 2), d.h. durch häufigeren Betrieb mit mehreren Kompressoren wurde mit einer tieferen Rücklauftemperatur im Zwischenkreislauf gefahren, und damit ein grösserer Temperaturgradient zwischen Abwasser und Medium im Zwischenkreis erzeugt. So konnte die Leistung der Anlage aufrechterhalten werden, allerdings zum Preis einer Erhöhung der Antriebsenergie für die Wärmepumpe.



**Abbildung 12:** Zeitlicher Verlauf des Wärmedurchgangskoeffizienten (Rauten) und des fouling factors (Kreise) nach der Reinigung des Wärmetauschers am 17. März (Pfeil).

Zur Untersuchung der Ursachen für die ausgeprägte Verschmutzung wurden Proben von den Ablagerungen einerseits in den Rohren und andererseits auf der Oberfläche des Verschlussdeckels genommen. Die Proben wurden auf verschiedene chemische Elemente und auf den Glührückstand hin analysiert. Der Glührückstand ist ein Mass für den Anteil der anorganischen Bestandteile einer Probe, der in einem Biofilm typischerweise etwa 25% beträgt [19]. Wie aus Tabelle 3 ersichtlich, ist der anorganische Anteil insbesondere in den Rohren jedoch bedeutend höher. Zudem hat die Element-Analyse hohe Konzentrationen von Eisen und Phosphor ergeben. Positiv geladene Eisenteilchen haben eine starke Tendenz auf Oberflächen zu adsorbieren, also auch auf der Biofilmmatrix, die sich in den engen Rohren bildet und von der die im Abwasser enthaltenen feinen Partikel zurückgehalten werden. Mit der Zeit bildet das Gemisch aus Biofilm und eingelagerten Partikeln eine Barriere, die das Rohr vollkommen verstopfen kann. Dies zeigt sich sehr schön rechts in Abbildung 13, in der einige Rohre eine relativ starke Verschmutzung aufweisen, so dass der Volumenstrom im Wärmetauscher reduziert und der Druckverlust erhöht ist.

**Tabelle 3:** Glührückstand der Ablagerungen in den Rohren und am Deckel

Probenahmestelle	Glührückstand [%]
Rohr 1	57
Rohr 2	57
Deckel	38,5



**Abbildung 13:** Probenahmestellen am Deckel und in den Rohren.

### 5.1.3 Anlage RB2

Die Anlage RB2 bezieht die Wärme primär aus dem sauberem, rund 20°C warmen Kühlwasser eines Industriebetriebs und speist sie in einen Wärmeverbund in Birsfelden ein. Falls infolge von Wartungsarbeiten kein Kühlwasser anfällt, wird auf gereinigtes Abwasser als Wärmeträger umgeschaltet. Dies geschieht gemäss Betreiber nur an wenigen Tagen pro Jahr. Der Durchfluss des Wärmeträgers durch den Tauscher kann durch eine zweistufig regelbare Pumpe variiert werden. Die Anlage hat keinen Zwischenkreislauf. Das Kältemittel wird direkt in den Wärmetauscher geleitet, wo es ausserhalb der Rohrbündel verdampft. Früher ist die Anlage ausschliesslich mit gereinigtem Abwasser betrieben worden. Dabei sind Verschmutzungsprobleme aufgetreten, die zur Verstopfung des Wärmetauschers geführt haben. Seit die Anlage mit Kühlwasser betrieben wird, sind keine Probleme mehr aufgetreten. Beim zeitweiligen Betrieb mit gereinigtem Abwasser wird aber auch jetzt eine leichte Verschmutzung beobachtet, die sich jedoch mit dem Wechsel auf Kühlwasser wieder zurückbildet.

Zur Verifizierung der vom Betreiber gemachten Beobachtung wurde die Wärmetauscherleistung während eines mehrwöchigen Versuchsbetriebs mit gereinigtem Abwasser erfasst. Daneben wurde auch der Einfluss der Pumpenleistung auf den Wärmedurchgangskoeffizienten untersucht. Zur Ergänzung der bestehenden Messung des Volumenstroms und der Zulauf- und Ablauftemperatur des Abwassers auf der Anlage, wurden während der Untersuchung zusätzlich noch die Vor- und Rücklauftemperatur im Kältemittelkreislauf gemessen und zur Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten verwendet (Anhang 11).

Die Ergebnisse der Untersuchung, die aus betrieblichen Gründen nach zwei Wochen abgebrochen werden musste, liessen keine Abnahme der Wärmetauscherleistung oder des Durchflusses erkennen. Auch der Wärmedurchgangskoeffizient änderte sich während der Untersuchung nicht, zeigte jedoch eine klare Abhängigkeit vom der Pumpenleistung. Für die Durchflussstufen von 110-120 m<sup>3</sup>/h und von 150-160 m<sup>3</sup>/h ergaben sich Wärmedurchgangskoeffizienten von  $k=740 \text{ W/m}^2/\text{K}$  resp.  $k=890 \text{ W/m}^2/\text{K}$ . Der Unterschied beträgt 150 W/m<sup>2</sup>/K bei einer Standardabweichung von 72 W/m<sup>2</sup>/K.

Auf dieser Anlage tritt innerhalb von zwei Wochen also keine erkennbare Verschmutzung auf. Diese Feststellung deckt sich mit den Ergebnissen von Messungen auf anderen Anlagen, bei denen sich die Verschmutzung auch erst nach mehreren Wochen manifestierte. Bei dem um 25% tieferen Durchfluss wird eine Abnahme des Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$  um 17% errechnet. Dies ist nicht unerwartet, denn es ist bekannt, dass die Grösse des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  in der Grenzschicht (Abbildung 11) von der Fliessgeschwindigkeit abhängt [18]. Hier bedeutet es jedoch, dass die Wärmetauscherverschmutzung den Wärmedurchgang nicht nur wegen des Widerstands in der

Schmutzschicht reduziert, sondern zusätzlich auch noch wegen des schlechteren Wärmeübergangs in der abwasserseitigen Grenzschicht, wenn der Durchfluss durch den Wärmetauscher verschmutzungsbedingt vermindert ist.

#### 5.1.4 Auswertung der Daten

In Tabelle 2 sind die wichtigsten Kenngrössen der neun untersuchten Anlagen mit Rohrbündeltauschern zusammengestellt. Die verwendeten Reinigungsarten werden im Abschnitt 7.2 und die verschiedenen Vorfiltertypen im Abschnitt 6.2 näher beschrieben. Hier wird der Zusammenhang zwischen der Abwasserführung, dem Vorhandensein eines Vorfilters und der Verschmutzung des Wärmetauschers diskutiert. Dazu liegen verschiedene Berichte von Anlagenbetreibern über in früheren Jahren gemachte Erfahrungen vor:

- Die Anlage RB1 verfügte über einen Vorfilter, und häufige Wärmetauscherreinigungen wurden erst nötig, nachdem der Vorfilter vor ein paar Jahren entfernt worden war.
- Bei der Anlage RB2 verstopfte der Wärmetauscher innert kurzer Zeit. Die Installation einer Bürstenreinigungsanlage brachte keine Verbesserung, da die Bürsten oft in den Rohren stecken blieben. Als vor der Pumpe ein Ansaugsiebkopf installiert wurde, musste der Wärmetauscher nur noch zweimal jährlich, der Vorfilter allerdings beinahe täglich gereinigt werden. Mit der Umstellung von Abwasser auf sauberes Kühlwasser konnte der Vorfilter entfernt werden und der Wärmetauscher wurde in den letzten zwei Jahren noch nie gereinigt.
- Der Wärmetauscher der Anlage RB7, die keinen Vorfilter hatte, musste häufig gereinigt werden. Als ein Sandfilter eingebaut wurde, verringerte sich die Verschmutzung des Wärmetauschers deutlich. Da jedoch der Sandfilter auch Verschmutzungsprobleme hatte, wurde er entfernt als die Kläranlage um eine Filtrationsstufe erweitert wurde. Die Anlage läuft seither problemlos.
- Auf mehreren Anlagen waren früher die Verschmutzungen derart massiv, dass die Wärmetauscher oder Vorfilter verstopften.

Heute sind die Reinigungsintervalle, die als Indiz für das Ausmass der Verschmutzungsprobleme angesehen werden können, relativ gross. In Tabelle 4 sind die durchschnittlichen Reinigungsintervalle der untersuchten Rohrbündeltauscher zusammengestellt. Dabei fehlen RB2, da diese Anlage im Normalfall nicht mit Abwasser beschickt wird, und RB4, da der Wärmetauscher dieser Anlage routinemässig einmal im Monat und nicht aufgrund von Informationen über die Verschmutzung gereinigt wird. Aus Tabelle 4 geht hervor, dass sich das Vorhandensein eines Vorfilters, und daneben auch die Abwasserführung ausserhalb der Rohrbündel, auf die Häufigkeit der Wärmetauscherreinigung auf den untersuchten Anlagen positiv auswirkt: Wärmetauscher mit Vorfilter werden im Durchschnitt nur alle 24 Monate gereinigt.

**Tabelle 4:** Durchschnittliche Reinigungsintervalle der Wärmetauscher abhängig von der Konfiguration

Reinigungsintervalle im Durchschnitt	Anlagen Anzahl	Vorfiltration	Abwasserführung
3 Monate	1	nein	innen
18 Monate	2	nein	aussen
24 Monate	3	ja	innen
24 Monate	1	ja	aussen

#### 5.1.5 Folgerungen

- Auf jedem mit Abwasser beschickten Rohrbündelwärmetauscher bildet sich eine Schmutzschicht. Nur für die Betreiber der Anlage RB2, die mit sauberem Kühlwasser

beschickt wird, der Anlage RB3, deren Wärmetauscher aus Kupfer besteht, und der Anlage RB8, die einen häufig gereinigten Beutelfilter hat, ist die Verschmutzung kein Thema.

- Wärmetauscher mit Abwasserführung ausserhalb der Rohrbündel reagieren weniger empfindlich auf Verschmutzungsprobleme und ermöglichen es damit die Reinigungsintervalle zu verlängern. Eine Vorfiltration und das Vorhandensein einer 4. Stufe auf der Kläranlage tragen ebenfalls entscheidend dazu bei, die Reinigungsintervalle der untersuchten Plattenwärmetauscher zu verlängern.
- Das Ausmass der Verschmutzung kann derart massiv sein, dass der Wärmedurchgang um bis zu 50% reduziert wird. Die Wärmetauscherleistung lässt sich aber dennoch aufrechterhalten indem die Rücklaufemperatur im Zwischen- oder Kühlkreislauf durch eine Erhöhung der Wärmepumpenleistung abgesenkt wird. Allerdings steigert dies die Antriebskosten für die Wärmepumpe und ist nur möglich bis zur unteren Limite der Rücklaufemperatur (Vereisungsgefahr).
- Die zeitliche Entwicklung der Verschmutzung auf den untersuchten Wärmetauschern verläuft, wie sich aus den Reinigungsintervallen ersehen lässt, sehr unterschiedlich. Während die Verschmutzung bei den einen Anlagen schon nach wenigen Wochen messbar war, wurde sie bei anderen von den Anlagenbetreibern erst nach Jahren oder überhaupt nicht festgestellt.
- Für die optimale Planung und Anwendung von Massnahmen gegen die Verschmutzung empfiehlt sich die Messung und Aufzeichnung der Grössen, die das Ausmass der Verschmutzung anzeigen, wie die Druckdifferenz und der Volumenstrom des Abwassers im Wärmetauscher, oder die Temperaturen im Abwasser und im Zwischen- oder Kühlkreislauf (Abschnitt 7.5.2).

## 5.2 Plattentauscher

### 5.2.1 Übersicht der untersuchten Anlagen

Bei der Untersuchung der mit Plattentauschern (PT) betriebenen Anlagen hat sich der Abstand zwischen den Wärmetauscherplatten als relevante Einflussgrösse für die Verschmutzungsproblematik erwiesen. Zusätzlich ist auch für diesen Anlagentyp das Vorhandensein einer Vorreinigung von Bedeutung. In Tabelle 5 ist für neun Anlagen mit Plattentauschern der Abstand zwischen den Platten, die Art und das Intervall der Wärmetauscherreinigung, sowie das Vorhandensein eines Vorfilters und dessen Reinigungsintervall aufgelistet. Da alle diese Anlagen ebenfalls mit gereinigtem Abwasser betrieben werden, ist auch das Vorhandensein einer 4. Stufe (Filtration) auf der Kläranlage erfasst worden.

**Tabelle 5:** Untersuchte Anlagen mit Plattenwärmetauschern

Anlage	Plattenwärmetauscher			Abwasser		
	d [mm]	Reinigungsart	Reinigungsintervall	Vorfilter	Reinigungsintervall	4. Stufe ARA
PT1	2-3	chemisch	4 x pro Jahr	Sieb	zusammen mit WT	nein
PT2	6-8	chemisch	1 x pro Jahr	Bernoullifilter	2 x pro Stunde	ja
PT3	40	mechanisch	1 x pro Woche	-	n.a.	nein
PT4	5	mechanisch	2 x pro Jahr	Sieb+Bernoullifil	automatisch	nein
PT5	3-4	automatisch	1 x pro Tag	Bernoullifilter	1 x pro Stunde	nein
PT6	7	mechanisch	3 x pro Jahr	-	n.a.	ja
PT7	2-3	chemisch	1 x pro Jahr	Rückspülsieb	automatisch	ja
PT8	9-12	mechanisch	1 x pro Jahr	Bernoullifilter	automatisch	nein
PT9	1.6-1.8	chemisch	2 x pro Jahr	Mehrfachsieb	1 x pro Woche/Jahr	nein

d bezeichnet den Abstand zwischen den Platten

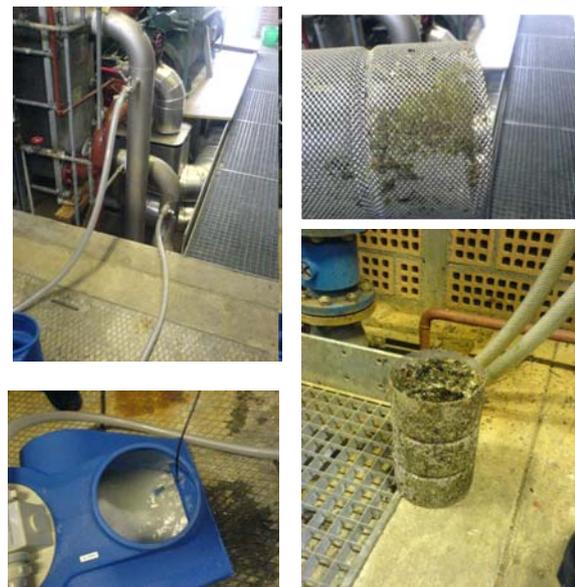
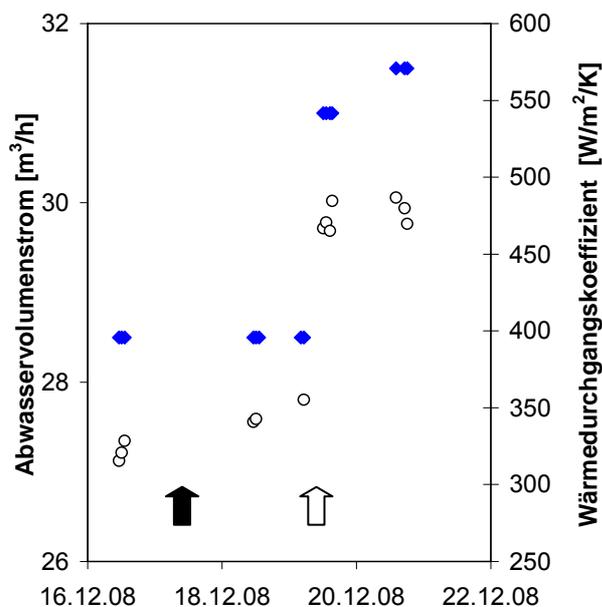
Auf den Anlagen PT1, PT2, PT3 und PT4 wurden eigene Untersuchungen durchgeführt.

## 5.2.2 Anlage PT1

Die Anlage PT1 entzieht die Wärme dem gereinigten Abwasser der Kläranlage Rietliu in Wädenswil und speist sie ganzjährig in einen Wärmeverbund ein. Die Anlage hat einen herkömmlichen Plattenwärmetauscher, eine Vorfiltration mittels Siebfilter sowie einen Zwischenkreislauf. Da immer wieder Verschmutzungen festgestellt werden, wird die Anlage ca. alle 3 Monate nach dem im Abschnitt 7.2.4 beschriebenen Verfahren mit Säure und Lauge gereinigt. Die Reinigung wird vorgenommen, sobald der vor dem Wärmetauscher gemessene Abwasservolumenstrom deutlich unter dem maximal möglichen Durchfluss liegt.

Untersucht wurde hier die Frage, ob die Abnahme des Durchflusses primär auf die Verschmutzung des Vorfilters oder auf die Verschmutzung des Wärmetauschers zurückzuführen ist, und wie sehr Verschmutzung und Durchflussabnahme den Wärmedurchgang im Wärmetauscher reduzieren. Da der Durchfluss auf der Anlage erfasst wird, mussten für diese Untersuchungen nur noch die Abwassertemperatur im Zu- und Ablauf des Wärmetauschers, sowie die Vorlauf- und Rücklaufemperatur im Zwischenkreislauf nach der im Anhang 11.1 beschriebenen Methode gemessen werden.

In einer ersten Messperiode, in welcher Vorfilter und Wärmetauscher gleichzeitig gereinigt worden waren, wurde nach der Reinigung, bei der sich eine sehr massive Verschmutzung des Vorfilters gezeigt hatte (Foto rechts unten in Abbildung 14) ein Anstieg des Durchflusses um 26% beobachtet. In der zweiten Messperiode wurde am 17.12.08 nur der Vorfilter, und dann am 19.12.08 der Wärmetauscher gereinigt. Hier hatte die Vorfilterreinigung keinen erkennbaren Effekt, während der Abwasservolumenstrom und der Wärmedurchgangskoeffizient nach der Wärmetauscherreinigung um 10% resp. 37% höher waren als vorher (Abbildung 14 links). Dieses Ergebnis ist dadurch begründet, dass der Vorfilter bei dieser Reinigung nur eine sehr leichte Verschmutzung aufwies (Foto rechts oben in Abbildung 14).

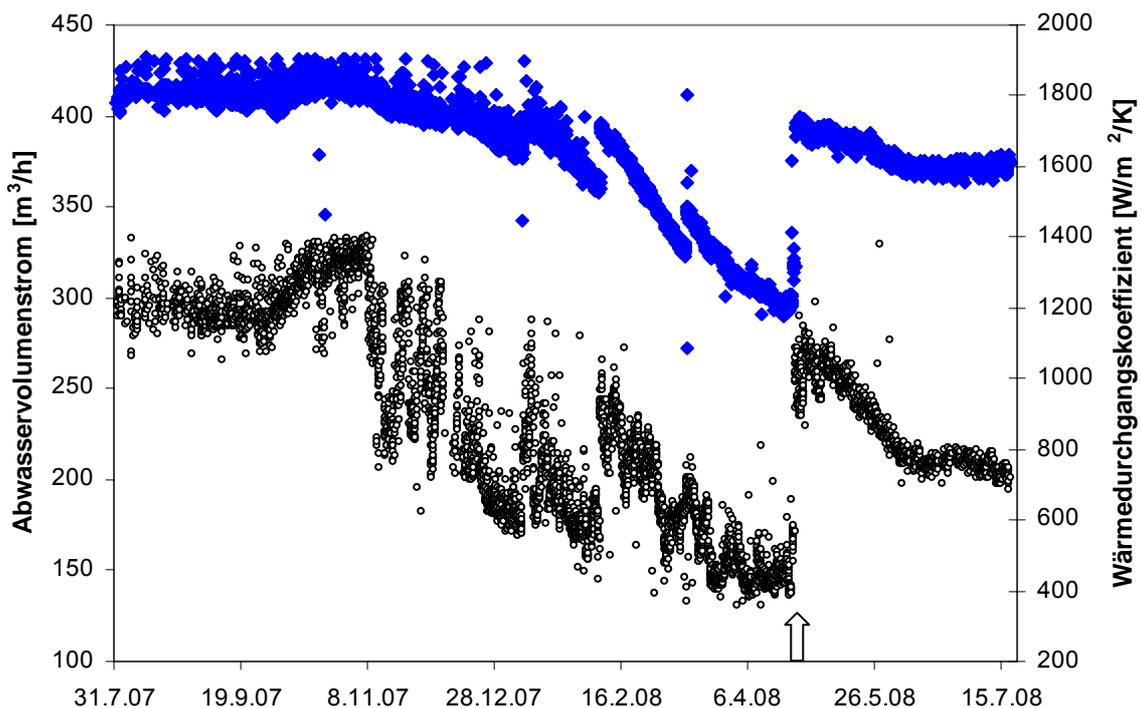


**Abbildung 14:** Effekt der Reinigung des Vorfilters (schwarzer Pfeil) und des Wärmetauschers (weisser Pfeil) auf den Abwasservolumenstrom (Rauten) und den Wärmedurchgangskoeffizienten (Kreise). Die Fotos zeigen die Wärmetauscherreinigung mittels Säure und Lauge (links) und zwei sehr unterschiedlich stark verschmutzte Siebfilter (rechts).

Die Messungen zeigen, dass bei der zweiten Reinigung vor allem der Wärmetauscher von der Verschmutzung betroffen war: Je grösser die Verschmutzung, desto grösser der Reziprokwert des fouling factors  $1/f$ , und damit der Anstieg des Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$ , nachdem der Wärmetauscher gereinigt wurde (Gleichung 3 im Anhang 11.3). Die Untersuchung zeigt, dass die Verschmutzung von Vorfilter und Wärmetauscher, wahrscheinlich infolge von Schwankungen in der Abwasserqualität, nicht immer dem gleichen Muster folgt. Da die Wärmetauscherreinigung mehrere Stunden, die Vorfilterreinigung jedoch weniger Zeit in Anspruch nimmt, macht es Sinn, zuerst einmal den Vorfilter zu reinigen, wenn ein Abfall des Durchflusses zu beobachten ist.

### 5.2.3 Anlage PT2

Die Anlage PT2 steht auf dem Kläranlagengelände in Altenrhein, hat einen Zwischenkreislauf und zwei baugleiche Plattenwärmetauscher, sogenannte Freistrom-Wärmetauscher, in denen das Abwasser frei zirkulieren kann. Aus dem Nachklärbecken fliesst das gereinigte Abwasser in einen Vorlagebehälter, aus dem es durch einen Vorfilter in die Wärmetauscher gepumpt wird, wo ihm Wärme für die Klärschlamm-trocknung entzogen wird. Alle zur Bestimmung der Wärmetauscherleistung benötigten Daten werden auf dem Leitsystem der Kläranlage registriert.



**Abbildung 15:** Effekt der Wärmetauscherreinigung (Pfeil) auf den zeitlichen Verlauf des Abwasservolumenstroms (Rauten) und des Wärmedurchgangskoeffizienten (Kreise).

Abbildung 15 zeigt, dass der Abwasservolumenstrom im zweiten Halbjahr 2007 relativ stabil war, und dann aber wegen zunehmender Verschmutzung der Wärmetauscher innerhalb von vier Monaten von  $400 \text{ m}^3/\text{h}$  auf  $300 \text{ m}^3/\text{h}$  abfiel. Nachdem die Tauscher am 23. April 2008 mit einer verdünnten Lauge gereinigt worden waren, stieg der Durchfluss wieder auf etwa  $400 \text{ m}^3/\text{h}$  an und nahm in den drei darauf folgenden Monaten nur wenig ab. Der Wärmedurchgangskoeffizient stieg ebenfalls an von rund  $480 \text{ W/m}^2/\text{K}$  auf  $1100 \text{ W/m}^2/\text{K}$ , fiel aber innerhalb von sechs Wochen wieder auf das Niveau von  $750 \text{ W/m}^2/\text{K}$  zurück (Abbildung 15). Die für die Wärmetauscherleistung massgebliche Temperaturdifferenz  $\Delta T_{WT}$  zwischen dem Abwasser und dem Wasser im Zwischenkreislauf (Gleichungen 2 und 4 im Anhang 11.3) war in den ersten

Monaten stabil bei 4 K, stieg bis zur Reinigung auf 7 K, fiel danach wieder auf 4 K zurück und stabilisierte sich dann bei 5 K.

Die Daten zeigen, dass die Entwicklung der Wärmetauscherverschmutzung zu verschiedenen Zeiten recht unterschiedlich verlaufen ist. Diese Beobachtung ist damit zu erklären, dass das Abwasser im Wärmetauscher steht, wenn kein Wärmeentzug erfolgt, und dass die Anlage wegen baulichen Erweiterungen immer wieder für eine Weile stillgelegt werden musste, wodurch das Einsetzen von Biofouling bekanntermassen stark begünstigt wird. Die Wärmetauscherleistung konnte trotz Verschmutzung konstant gehalten werden, da deren negative Auswirkung auf den Wärmedurchgangskoeffizienten durch eine grössere Temperaturdifferenz  $\Delta T_{WT}$  kompensiert wurde, die allerdings mit einer erhöhten Wärmepumpenleistung erkaufte werden musste. Interessant ist, dass am 7. Februar und am 12. März 2008 ein plötzlicher Anstieg des Durchflusses im Wärmetauscher zu beobachten ist, für den der Anlagenbetreiber keine Erklärung hat. In Fällen, in denen die Verschmutzung durch einen Biofilm verursacht wird, ist immer wieder beobachtet worden, dass sich dieser spontan von der Oberfläche ablöst nach einer Änderung von chemischen oder physikalischen Bedingungen. Es ist also gut möglich, dass die im Rahmen der Bauarbeiten erfolgten Betriebsumstellungen einen spontanen Abgang des Biofilms bewirkten.

#### **5.2.4 Anlage PT3**

Die von der Anlage PT3 dem gereinigten Abwasser der Kläranlage Maloja in Stampa entzogene Wärme wird für die Warmwasseraufbereitung und die Raumheizung im Kläranlagengebäude verwendet. Die Anlage ist relativ klein mit einer thermischen Leistung von 29 kW und einer Wärmetauscherfläche von 20 m<sup>2</sup>. Sie verfügt über keinen Zwischenkreislauf und keinen Vorfilter. Die Wärmeentnahme erfolgt durch einen speziellen, von der Firma FEKA Energiesysteme AG entwickelten Wärmetauscher [4]. Der Wärmetauscher steht ausserhalb des Betriebsgebäudes in einem von oben leicht zugänglichen Becken und hat einen Plattenabstand von 40 Millimetern (Abbildung 16). Das gereinigte Abwasser fliesst vom Ablauf der Kläranlage in das Becken und wird dort mehrmals umgewälzt, sodass der Wärmetauscher mehrere Male durchströmt wird.

Die Anlage steht in einem hoch gelegenen Tal und weist grosse Schwankungen von Volumenstrom und Qualität des Abwassers auf, da die Einwohnerzahl im Einzugsgebiet der Kläranlage saisonal zwischen 300 und 3000 Einwohnern variiert. Laut Anlagenbetreiber ist die Wärmetauscherverschmutzung stark von den Abwasserparametern abhängig. Wenn die Konzentration von partikulären Stoffen im Abwasser hoch ist, verschmutzt der Wärmetauscher schneller, wenn der Durchfluss hoch ist, langsamer. Wegen des grossen Plattenabstands und der guten Zugänglichkeit ist die Reinigung des Wärmetauschers sehr einfach. Routinemässig wird der Wärmetauscher wöchentlich mit einem Wasserschlauch, monatlich mit einer Bürste und alle paar Monate mit Hochdruck gereinigt. Eine Beeinträchtigung der Leistung zwischen den Reinigungen ist nicht feststellbar.

Um die Art der Verschmutzung zu ermitteln, wurden Proben von der Wärmetauscheroberfläche genommen und analysiert. Die Analyse ergab einen Glührückstand von 27,5%, was auf eine Verschmutzung durch Biofilm hindeutet, für den ein Glührückstand von etwa 25% typisch ist [19]. Um dieses Ergebnis zu bestätigen, wurde beschlossen, die Reinigung für mehrere Monate auszusetzen und dann eine zweite Probe zu nehmen. Da die Verschmutzung nach dieser Periode aber immer noch zu gering war für eine Probenahme, musste das Vorhaben aufgegeben werden.



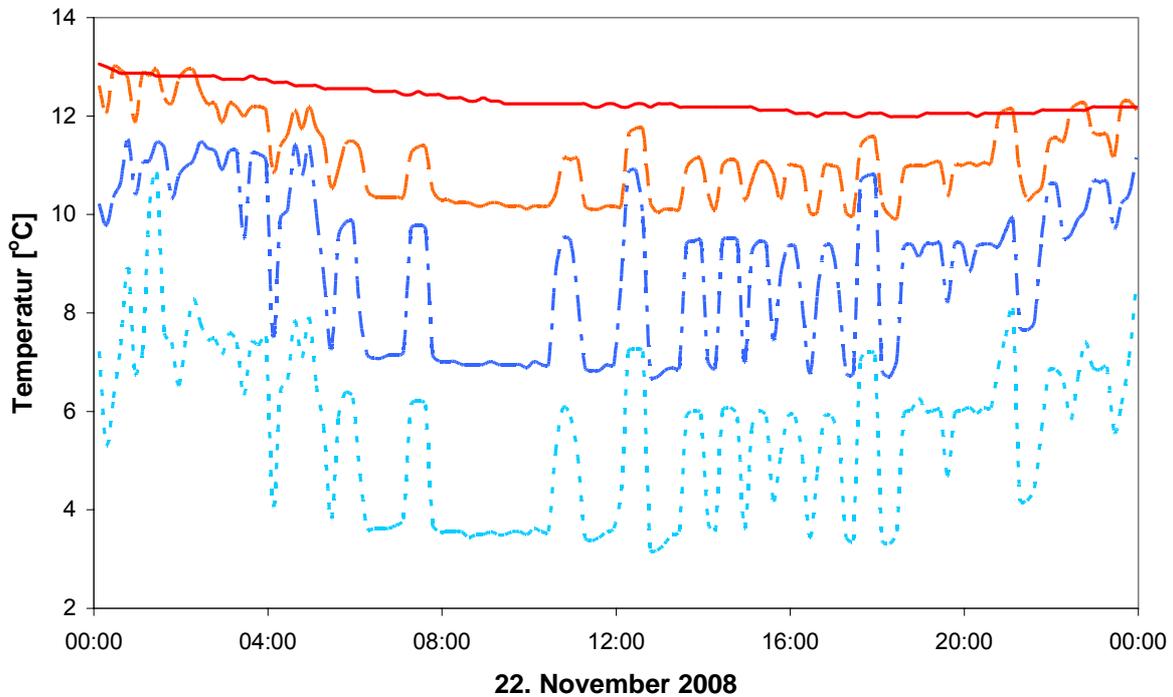
**Abbildung 16:** Offener Plattenwärmetauscher mit 40 Millimetern Plattenabstand.

Die Anlage ist verhältnismässig robust gegenüber Änderungen der Abwasserqualität, die Verschmutzung kann visuell kontrolliert und der Wärmetauscher einfach gereinigt werden. Wie sich gezeigt hat, könnte die Reinigung auch seltener vorgenommen werden, und liesse sich laut Angaben des Herstellers durch den Einbau eines Bürstenreinigungssystems automatisieren. Der Wärmetauscher stellt eine interessante Alternative zu konventionellen Plattentauschern dar, ist gegenüber diesen aber weniger kompakt und energieeffizient.

### 5.2.5 Anlage PT4

Die Anlage PT4 versorgt über einen Wärmeverbund ein grösseres Wohngebiet in Arbon mit einer Anschlussleistung von 760 kW mit Heizwärme. Die Anlage wird bivalent betrieben mit vier Wärmepumpen von total 300 kW thermischer Leistung und einem Ölkessel, mit einer thermischen Leistung von 720 kW, die zur Abdeckung der Wärmelastspitzen und beim Ausfall einer Wärmepumpe eingesetzt wird. Die Anlage verfügt über einen mit Glykol versetzten Zwischenkreislauf. Die Wärmepumpen werden mit gereinigtem Abwasser betrieben, das über eine Druckleitung in die Wärmezentrale und durch einen Vorfilter in einen Freistrom-Plattenwärmetauscher gepumpt wird. Da der Wärmetauscher vor allem nach der Stillstandszeit der Wärmepumpen im Sommer starke Verschmutzungserscheinungen zeigte, wird er nun vor oder nach der Heizperiode routinemässig gereinigt, und das Abwasser wird ausserhalb der Heizperiode abgelassen. Bei der Reinigung wird der Wärmetauscher aufgeschraubt und mit einem Wasserschlauch abgespritzt, wodurch der Biofilm abgewaschen wird.

Um die Auswirkungen der Verschmutzung auf die Leistung des Wärmetauschers zu erfassen, wurden während mehreren Wochen der Durchfluss und die Zu- und Ablauftemperatur des Abwassers, sowie die Vor- und Rücklauftemperatur im Zwischenkreislauf nach der im Anhang 11.1 und 11.2 beschriebenen Methode gemessen. Die Auswertung ergab, dass der Durchfluss von anfänglich 78,5 m<sup>3</sup>/h während 57 Tagen linear auf 63,3 m<sup>3</sup>/h, d.h. um 2,4% pro Woche abgenommen hatte. Die Temperaturwerte schwankten Betriebs- und Witterungsabhängig relativ stark während der Messperiode. Am 22. November zwischen 8 und 10 Uhr lief die Anlage jedoch stabil auf voller Leistung mit einer Abwassertemperatur von 12,3 °C, einer Abwasserabkühlung von 2,1 K und einer Vor- und Rücklauftemperatur im Zwischenkreislauf von 7,0 °C resp. 3,5 °C (Abbildung 17). Aus diesen Daten rechnet sich eine Spitzenleistung für den Wärmetauscher von 185 kW (Gleichung 1 im Anhang 11) und ein Wärmedurchgangskoeffizient von 510 W/m<sup>2</sup>/K (Gleichungen 7 und 8). Die Abnahme des Wärmedurchgangskoeffizienten über die ganze Messperiode war ebenfalls linear und betrug 3,4% pro Woche.



**Abbildung 17:** Am 22. November 2008 gemessener Verlauf der Zulauf­temperatur (durchgezogen) und Ablauf­temperatur (lang gestrichelt) des Abwassers und der Vorlauf­temperatur (strichpunkt­iert) und Rücklauf­temperatur (punkt­iert) im Zwischenkreislauf.

Die Wärmetauscherverschmutzung, die den Betrieb früher beeinträchtigte, wurde auf Schwankungen der Abwasserqualität zurückgeführt und kann teilweise eine Folge sein der fehlenden Filtrationsstufe auf der Kläranlage. Wegen der wechselnden und unbekannt­en Zusammensetzung der Schmutzschicht erwies sich die chemische Reinigung als ineffektiv. Heute wird der Wärmetauscher aufgrund der vom Betreiber gemachten Versuche und Erfahrungen während der Heizperiode permanent durchströmt und nach dem beschriebenen Verfahren zweimal im Jahr gereinigt. Die Abnahme des Wärmedurchgangskoeffizienten korreliert weitgehend mit der Abnahme der Durchflussgeschwindigkeit des Abwassers im Wärmetauscher.

### 5.2.6 Auswertung der Daten

In Tabelle 5 sind die wichtigsten Kenngrößen der neun untersuchten Anlagen mit Plattentauschern zusammengestellt. Die verwendeten Reinigungsarten werden im Abschnitt 7.3 und die verschiedenen Vorfiltertypen im Abschnitt 6.2 näher beschrieben. Hier wird der Zusammenhang zwischen der Auslegung des Wärmetauschers, dem Vorhandensein eines Vorfilters und der Wärmetauscherverschmutzung diskutiert. Dazu liegen verschiedene Berichte von Anlagenbetreibern über in früheren Jahren gemachte Erfahrungen vor:

- Bei der Anlage PT4 konnte ein stabiler Betrieb des Wärmetauschers erst erreicht werden, nachdem eine zweistufige, vom Betreiber selber optimierte Filtrationsanlage eingebaut worden war. Vorher musste der Wärmetauscher sehr oft gereinigt werden.
- Der Wärmetauscher der Anlage PT5 verschmutzte stark, bis hin zur Verstopfung, die mit hohen Konzentrationen von Partikeln im Ablauf der Kläranlage korrelierte, die eine geringe Reinigungsleistung hat. Nach dem Einbau von neuen Wärmetauschern und einer wirkungsvollen Vorfiltration mit Bernoullifilter und täglicher automatischer chemischer Reinigung des Wärmetauschers kann die Anlage stabil betrieben werden.

- Der Wärmetauscher der Anlage PT6 zeigt immer dann eine Verstopfung, wenn die Kläranlage durch saisonal bedingte Einleitungen von verschmutztem Industrieabwasser überlastet ist. Dann verstopft die 4. Stufe (Filtration) der Kläranlage und das Abwasser fliesst direkt in den Wärmetauscher, der keinen Vorfilter hat. Der Anlagenbetreiber führt die Verstopfung des Wärmetauschers deshalb vor allem auf erhöhte Partikelkonzentrationen im Abwasser zurück.
- Ein stabiler Betrieb der Anlage PT9 wurde erst möglich nachdem der Betreiber selber einen Vorfilter entwickelt hatte, der aus mehreren Sieben besteht, von denen das Erste wöchentlich, die anderen jährlich gereinigt werden.

Seit die Anlagenbetreiber die negativen Auswirkungen der Partikel im Abwasser bezüglich Verschmutzung und Verstopfung der Plattentaucher erkannt haben, werden die Anlagen routinemässig mit Vorfiltern aus- oder nachgerüstet. Dementsprechend wird in der unter den Anlagenbetreibern durchgeführten Umfrage heute als primäre Verschmutzungsursache die Biofilmbildung bezeichnet. Von den untersuchten Plattentauchern haben nur die Anlage PT3, die über einen speziellen Wärmetauscher verfügt (Abbildung 16) und die Anlage PT6 mit Baujahr 1994 keinen Vorfilter (Tabelle 5). Der positive Effekt der Vorfiltration geht auch aus Tabelle 6 hervor, in der für die untersuchten Plattentaucher die durchschnittlichen Reinigungsintervalle aufgelistet sind, die als Indiz für das Ausmass der Verschmutzungsprobleme angesehen werden können. Die Anlagen PT3 und PT5 fehlen in der Tabelle, da der Wärmetauscher dieser Anlagen routinemässig nach festem Plan und nicht aufgrund einer festgestellten Verschmutzung gereinigt wird. Die Vorfiltration bewirkt eine Verlängerung der Reinigungsintervalle, die im Vergleich mit den Rohrbündeltauschern allerdings generell kürzer sind.

**Tabelle 6:** Durchschnittliche Reinigungsintervalle der Wärmetauscher abhängig von der Konfiguration

Reinigungsintervalle im Durchschnitt	Anlagen Anzahl	Vorfiltration	Plattenabstand
n.a.	-	nein	< 6 mm
4 Monate	1	nein	≥ 6 mm
7 Monate	4	ja	< 6 mm
12 Monate	2	ja	≥ 6 mm

Neben der Vorfiltration ist für das Reinigungsintervall aber auch die Auslegung der Plattentaucher von Bedeutung, für die zwei unterschiedliche Konstruktionsprinzipien Verwendung finden. Beim sogenannten Freistrom-Wärmetauscher kann das Abwasser frei im Tauscher zirkulieren und der Abstand zwischen den Platten ist relativ gross, während beim anderen Typ das Abwasser auf einem vorgegebenen Fliessweg zwischen den eng gepackten Platten hindurchströmt. Tabelle 6 zeigt, dass in Bezug auf die Verschmutzungsanfälligkeit des Wärmetauschers ein grosser Plattenabstand von Vorteil ist. Im Weiteren haben Vergleiche zwischen den verschiedenen Wärmetauschertypen ergeben, dass die Strömungsgeschwindigkeit des Abwassers in Plattentauchern im Allgemeinen kleiner ist als in Rohrbündeltauschern.

### 5.2.7 Folgerungen

- Das Problem der Verschmutzung der Plattentaucher durch Partikel ist durch die Ausrüstung der Anlagen mit Vorfiltern und durch deren technologische Verbesserungen in den letzten Jahren weitgehend entschärft worden. Die Wärmetauscherverschmutzung durch Biofilme aber ist ein Problem und dürfte es auch bleiben. Nur auf einer Anlage, deren Plattenwärmetauscher durch eine automatische chemische Spülung in kurzen Zeitintervallen gereinigt wird, zeigen sich keine Verschmutzungsprobleme.
- Eine Vorfiltration und das Vorhandensein einer 4. Stufe auf der Kläranlage tragen dazu bei, die Reinigungsintervalle der untersuchten Plattenwärmetauscher zu verlängern.
- Im Vergleich der untersuchten Anlagen waren diejenigen mit Freistrom-Wärmetauchern, d.h. die mit einem grossen Abstand zwischen den Platten, weniger verschmutzungsanfällig.

- Das Ausmass der Verschmutzung der untersuchten Plattenwärmetauscher zog gemäss den durchgeführten Messungen eine Reduktion der Abwasservolumenströme um 10% bis 25% nach sich. Für die Wärmedurchgangskoeffizienten ergab die Auswertung Werte, die einige Monate nach einer Wärmetauscherreinigung um 25% bis zu 60% unter den Werten für den sauberen Wärmetauscher lagen.
- Die zeitliche Entwicklung der Verschmutzung verlief bei den untersuchten Plattenwärmetauschern generell schneller als bei den Rohrbündeltauschern. Die gemessenen Wärmedurchgangskoeffizienten nahmen mit einer wöchentlichen Rate von 3-4% ab. Da nur auf wenigen der untersuchten Wärmetauscher längere Messreihen erhoben werden konnten, dürfen diese Zahlenwerte allerdings nicht ohne nähere Abklärung einfach auf andere Anlagen übertragen werden. Deshalb empfiehlt sich der Einbau von messtechnischen Einrichtungen, mit denen der Verlauf der Wärmetauscherverschmutzung verfolgt werden kann (Abschnitt 7.5.2).

## 5.3 Rinnentauscher

### 5.3.1 Übersicht der untersuchten Anlagen

In der Kanalisation können die baulichen Gegebenheiten, das Abflussregime und die Qualität des Abwassers sehr unterschiedlich sein, weshalb die Betriebsbedingungen für die mit Rohabwasser beschickten Wärmenutzungsanlagen sehr variabel sind. Die Variabilität ist viel grösser als diejenige bei Anlagen, die mit gereinigtem Abwasser betrieben werden, weil die Schwankungen bei diesen durch die Reinigung und mehrstündige Aufenthaltszeit des Abwasser in der Kläranlage gedämpft werden. Daher gibt es auch in Bezug auf die Verschmutzung und Reinigung von Rinnentauschern grosse Unterschiede. In Tabelle 7 sind zehn Anlagen mit Rinnentauschern aufgelistet, für welche die Reinigungsart und das Intervall der Wärmetauscherreinigung untersucht wurden.

**Tabelle 7:** Untersuchte Anlagen mit Rinnenwärmetauschern

Anlage	Rinnenwärmetauscher	
	Reinigungsart	Reinigungsintervall
RT1	mechanisch	2 x pro Jahr
RT2	keine	n.a.
RT3	mechanisch	1 x pro Monat
RT4	keine	n.a.
RT5	Hochdruck	1x pro Wintermonat
RT6	keine	n.a.
RT7	Hochdruck	1 x pro Jahr
RT8	keine	n.a.
RT9	Hochdruck	1 x pro Jahr
RT10	Schwallspülung	1 x pro Tag-Monat

Auf den Anlagen RT1 und RT2 wurden eigene Messungen durchgeführt.

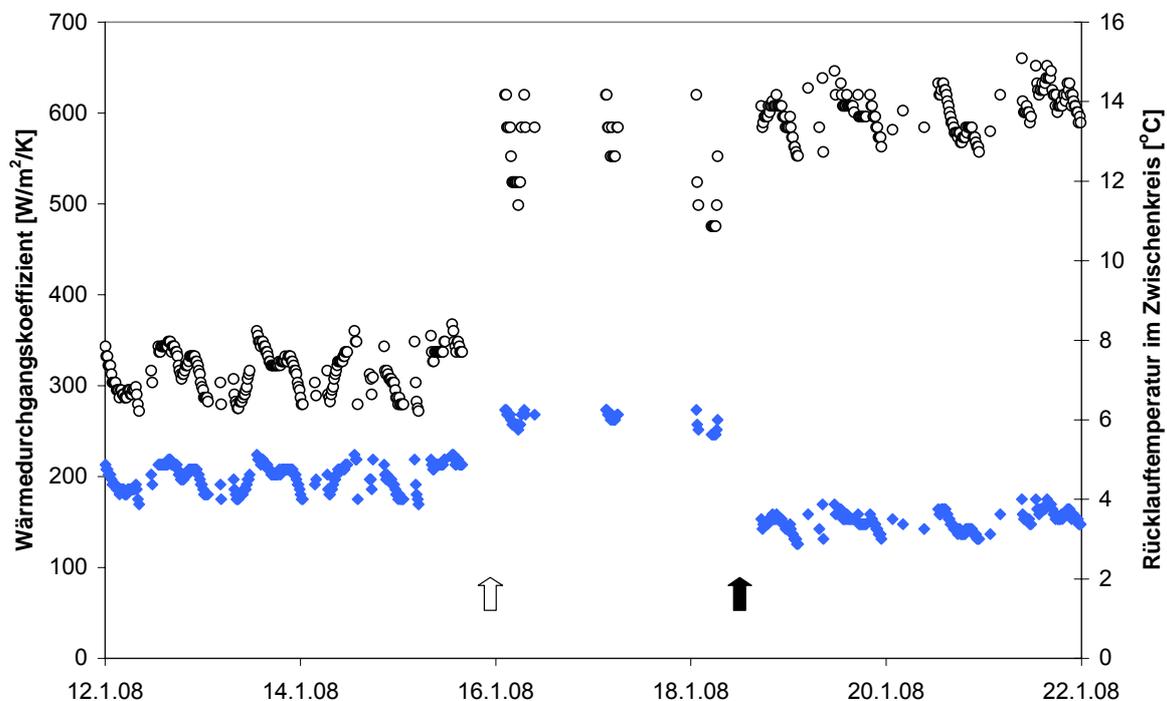
### 5.3.2 Anlage RT1

Die Anlage RT1 entzieht dem Rohabwasser in der Kanalisation von Zwingen mit einem Rinnentauscher Wärme. Die Anlage verfügt über zwei Wärmepumpen, welchen die entzogene Wärme über einen Zwischenkreislauf zugeführt wird. Wenn die Verschmutzung des Wärmetauschers zu gross wird, kann die Anlage nur noch mit einer Wärmepumpe betrieben werden, weil sonst die Abkühlung im Zwischenkreislauf zu gross wird und der Wärmeträger im Zwischenkreislauf gefrieren kann. Der Wärmetauscher der Anlage wird zweimal pro Jahr mit einem Besen gereinigt.

Zu untersuchen war die Frage nach dem Effekt der Reinigung auf den Wärmedurchgang und auf die Temperatur im Zwischenkreislauf. Dazu wurden während einer zehntägigen Untersuchungsperiode die Vor- und Rücklaufftemperatur im Zwischenkreislauf gemessen. Abwassertemperaturdaten, gemessen im Zulauf der einige hundert Meter stromabwärts gelegenen Kläranlage, wurden von deren Betreibern zur Verfügung gestellt.

Abbildung 18 zeigt den zeitlichen Verlauf der Rücklaufftemperatur im Zwischenkreis und des Wärmedurchgangskoeffizienten während der Untersuchungsperiode. Da die Änderung der Abwassertemperatur über den Wärmetauscher nicht bekannt war, konnte der Wärmedurchgangskoeffizient  $k$  mit Gleichung 8 im Anhang 11.3 in diesem Fall nur approximativ berechnet werden: Für  $\Delta T_{WT}$  wurde die Differenz zwischen der Abwassertemperatur und dem Mittel von Vorlauf- und Rücklaufftemperatur im Zwischenkreis eingesetzt, und die Leistung wurde mit  $W_{WT}=W_Z$  nach Gleichung 6 berechnet mit Werten für den Volumenstrom  $Q_Z$  im Zwischenkreis, die aus früheren Messungen bekannt waren.

Zu Beginn der Messperiode war der Wärmetauscher verschmutzt und der Wärmedurchgangskoeffizient hatte einen Wert von  $k \approx 350 \text{ W/m}^2/\text{K}$ . Am 15. Januar wurde der Wärmetauscher gereinigt, und um den Effekt der Reinigung quantifizieren zu können, wurde die Anlage in den darauf folgenden Tagen weiterhin mit nur einer Wärmepumpe betrieben. Wie aus Abbildung 18 ersichtlich, stieg der Wert des Wärmedurchgangskoeffizienten nach der Reinigung auf  $k_0 \approx 640 \text{ W/m}^2/\text{K}$ . Mit Gleichung 9 kann aus  $k$  und  $k_0$  der fouling factor, der ein Mass für die Wärmetauscherverschmutzung darstellt, berechnet werden zu  $f = 770 \text{ W/m}^2/\text{K}$ . Da die Reziprokwerte von  $k$ ,  $k_0$  und  $f$  als Widerstände für den Wärmedurchgang interpretiert werden können, ergibt sich aus den durchgeführten Messungen ein Anteil der Verschmutzung,  $1/f$ , am Gesamtwiderstand für den Wärmedurchgang,  $1/k$ , von 45%.



**Abbildung 18:** Effekt der Wärmetauscherreinigung (weisser Pfeil) und des Zuschaltens der zweiten Wärmepumpe (schwarzer Pfeil) auf den Wärmedurchgangskoeffizienten (Kreise) und die Rücklaufftemperatur im Zwischenkreislauf (Rauten).

Dank dem nach der Reinigung höheren Wärmedurchgangskoeffizienten kann der Wärmetauscher gemäss Gleichung 2 dieselbe Leistung mit einer kleineren Differenz zwischen

Abwasser- und Zwischenkreislauftemperatur erbringen. Daher war die Rücklauftemperatur im Zwischenkreis nach der Reinigung etwa zwei Kelvin höher als vorher. Am 18. Januar wurde dann die zweite Wärmepumpe zugeschaltet, und die Anlage konnte wieder die doppelte Leistung liefern, ohne dass die Temperatur im Zwischenkreislauf auf ein gefährlich tiefes Niveau absank.

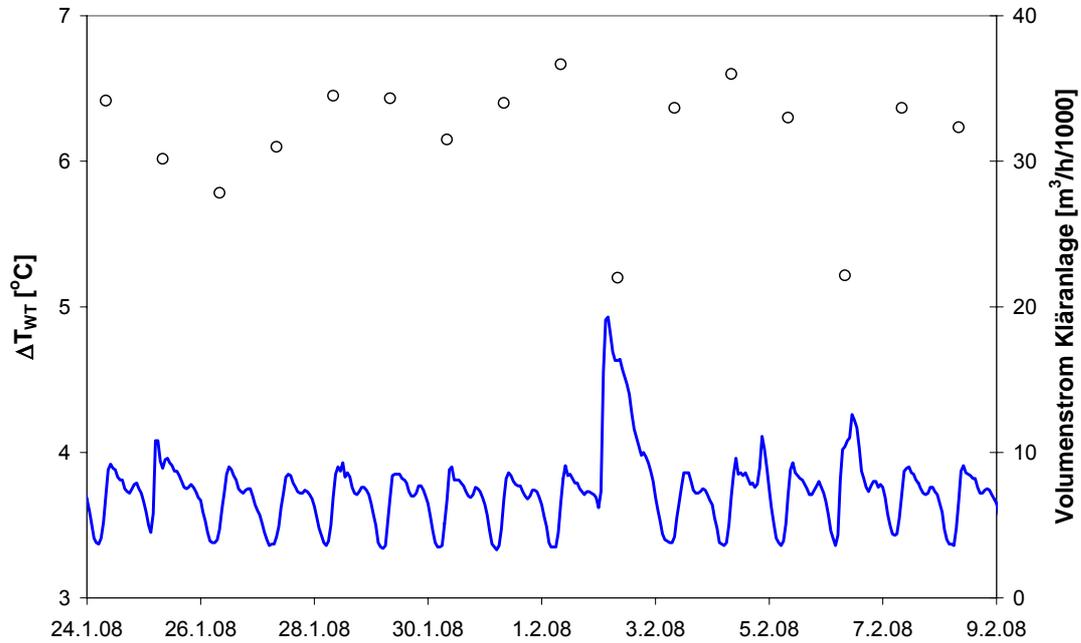
### 5.3.3 Anlage RT2

Die Anlage RT2 erzeugt für das Schulhaus Limmat in Zürich Wärme für die Raumheizung und die Warmwasseraufbereitung. Die Wärme wird mit einem Rinnentaucher von 72 m<sup>2</sup> Fläche aus einem nahe gelegenen Sammelkanal mit einem Trockenwetterabfluss von 200 bis 400 Litern pro Sekunde entnommen und wird mit einer Vorlauftemperatur von 65 °C an den Warmwasserspeicher und den Heizkreislauf abgegeben. Die Wärmepumpe ist auf eine Leistung von 250 kW ausgelegt und liefert damit rund 85% der benötigten Wärme. Die Deckung des restlichen Bedarfs erfolgt mit einem Gasbrennwertkessel.

Auf der Anlage ist ein modernes Leitsystem installiert, mit dem alle wichtigen Betriebsgrößen erfasst und über einen längeren Zeitraum gespeichert werden. Mit diesen Daten war es möglich, die Abhängigkeit der Wärmetauscherleistung von der Abwassertemperatur und von der Wärmetauscherverschmutzung durch Ablagerungen und Biofilme zu untersuchen. Dazu wurden die Abwassertemperatur, die Vorlauf- und Rücklauftemperatur im Zwischenkreis und die Wärmetauscherleistung, berechnet aus den Wärmezählerdaten im Zwischenkreislauf, verwendet. Zusätzlich standen Zuflussdaten der stromabwärts gelegenen Kläranlage zur Verfügung.

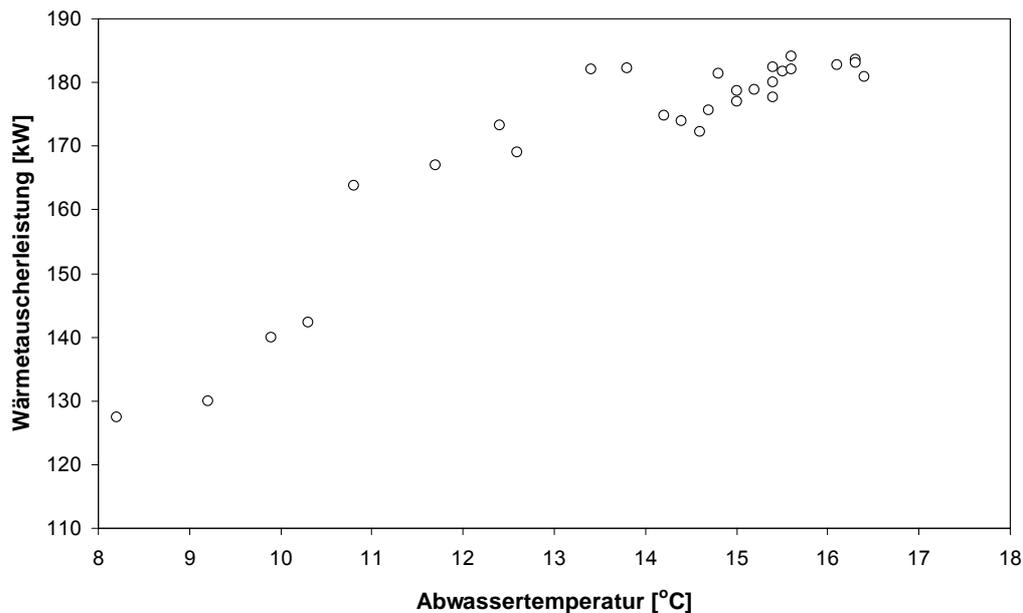
Zuerst wurde die Frage untersucht, ob die Wärmetauscherleistung in längeren Trockenwetterperioden abfällt, denn es ist bekannt, dass bei niedrigem Abfluss die Ablagerungen an der Sohle des Kanals zunehmen und dann bei einem starken Regenereignis allenfalls wieder aufgewirbelt und abgespült werden können. Die Auswertung mehrmonatiger Datenreihen ergab jedoch keinen Hinweis auf eine verschmutzungsbedingte Veränderung der gemessenen Wärmetauscherleistung. Gemäss Gleichung 2 im Anhang 11.3 ist es aber trotz konstanter Wärmetauscherleistung  $W_{WT}$  möglich, dass eine Verschmutzung vorhanden ist und zur Abnahme des Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$  führt, wenn diese Abnahme durch einen Anstieg der Temperaturdifferenz  $\Delta T_{WT}$  zwischen Abwasser und Medium im Zwischenkreis kompensiert wird. Abbildung 19 zeigt für eine zweiwöchige Untersuchungsperiode den gemessenen Volumenstrom des Abwassers und die Temperaturdifferenz  $\Delta T_{WT}$ , deren Werte jeweils für die mit maximaler Leistung laufende Wärmepumpe aus Gleichung 4 berechnet wurden. Aus der Abbildung geht in der Tat hervor, dass  $\Delta T_{WT}$  während den Regenereignissen vom 2. und 6. Februar kleiner war als während der vorangehenden Trockenwettertage. Nach dem Regen steigt  $\Delta T_{WT}$  aber sofort wieder an, weil mit nachlassender Schleppkraft des Wassers die aufgewirbelten Ablagerungen wieder auf die Kanalsohle, und damit auf die Wärmetauscheroberfläche, absinken. Zu beachten ist, dass die Volumenstromdaten der Kläranlage um die Fließzeit von ca. eine Stunde verschoben sind und die Abflüsse aus mehreren Kanalisationssträngen beinhalten.

Die Schlussfolgerung ist, dass der untersuchte Wärmetauscher stets eine kleine Verschmutzung aufweist, die kurzfristig auf hydraulische Veränderungen reagiert, aber keine langfristige Zunahme zeigt und für den Betrieb der Anlage kein Problem darstellt. Beim Wärmedurchgangskoeffizienten liess sich denn auch keine zeitliche Änderung feststellen; für alle untersuchten Datenreihen hatte er einen Wert von  $k=400\pm 40$  W/m<sup>2</sup>/K.



**Abbildung 19:** Temperaturdifferenz  $\Delta T_{WT}$  am Wärmetauscher (Kreise) und zeitliche Entwicklung des Abwasservolumenstroms (durchgezogene Kurve).

In Abbildung 20 ist die Wärmetauscherleistung in Abhängigkeit von der Abwassertemperatur dargestellt für Zeitpunkte, zu denen die Wärmepumpe mit maximaler Leistung lief. Die Abbildung illustriert die Bedeutung der Abwassertemperatur für die mit der Anlage zu erzielende Leistung.



**Abbildung 20:** Wärmetauscherleistung in Abhängigkeit von der Abwassertemperatur.

### 5.3.4 Auswertung der Daten

In Tabelle 7 sind die auf den untersuchten Anlagen praktizierten und im Abschnitt 7.4 näher beschriebenen Reinigungsarten sowie die Reinigungsintervalle aufgelistet, deren Länge beträchtlich variiert. Während gemäss den Angaben der Anlagenbetreiber einige Rinnenwärmetauscher nur selten oder gar nie, d.h. nur bei der turnusgemässen normalen Kanalreinigung, gesäubert werden, wird bei anderen Wärmetauschern relativ häufig eine Reinigung vorgenommen. Dafür lassen sich aber spezifische Gründe angeben:

- Die Anlage RT1 verfügt über keine Leistungsreserve, sodass der Wärmetauscher zweimal im Jahr gereinigt wird um einen verschmutzungsbedingten Leistungsabfall zu verhindern.
- Bei der Anlage RT3 ist das Gefälle über den Wärmetauscher relativ klein, was zusammen mit einer abflusshemmenden Kanalgeometrie unterhalb des Wärmetauschers eine erhöhte Sandablagerung bewirkt, die mechanisch entfernt werden muss.
- Der Wärmetauscher der Anlage RT5 ist in ein sogenanntes Bypassrohr eingebaut, das von der Kanalisation abzweigt und weiter stromabwärts wieder mit ihr zusammengeführt wird. Wegen dem geringeren Gefälle und der damit kleineren Strömung im Bypassrohr entstehen auf dem Wärmetauscher Ablagerungen von Sand und Kies, die mittels einer Hochdruckspülung abgeschwemmt werden müssen.
- Auf der Anlage RT10 wurden Versuche gefahren um abzuklären, ob mittels Schwallspülung Ablagerungen und Biofilme auf dem Wärmetauscher ganz oder teilweise entfernt werden können. Die dabei festgestellte geringe Auswirkung auf die Wärmetauscherleistung wurde mit der sehr geringen Biofilmbildung auf diesem Wärmetauscher erklärt. Andererseits beobachtet der Betreiber einer anderen, nicht in diese Untersuchung einbezogenen Anlage eine deutliche Verbesserung der Wärmetauscherleistung nach starken Regenereignissen.

Neben den gegebenen baulichen Faktoren in der Kanalisation, wie Sohlengefälle, Einbauten, Verzweigungen und Zusammenflüsse im Bereich des Wärmetauschers, ist für dessen Verschmutzung auch das Abflussregime von Bedeutung. Wie im Abschnitt 5.3.3 diskutiert ist die Abschwemmung oder Ablagerung von Feststoffen auf dem Wärmetauscher durch die Schleppkraft des Abwassers gegeben, die von der Fliessgeschwindigkeit und deren Variabilität abhängt. Eine weitere massgebliche Einflussgrösse der Verschmutzung ist die Abwasserqualität. Das nährstoffreiche Rohabwasser bietet ideale Bedingungen für das Biofilmwachstum, und mehrere Anlagenbetreiber haben die Erfahrung gemacht, dass spezielle Substanzen im Industrieabwasser Verschmutzungsprobleme verursachen. Andererseits nimmt die Verschmutzung im Normalfall nicht unbegrenzt zu, sondern erreicht einen Gleichgewichtszustand, in dem die Bildung von Biofilm gleich gross ist wie dessen Abschwemmung durch die Scherkraft des Abwassers und den Geschiebetrieb in der Kanalisation [20]. Sowohl für das Abflussregime wie für die Abwasserqualität ist zentral, wie gross der kommunale, der industriell-gewerbliche und der Fremdwasseranteil am Abwasseraufkommen ist.

Mögliche Massnahmen gegen die Verschmutzung sind neben den in Kapitel 7 beschriebenen Reinigungsmethoden die Überdimensionierung des Wärmetauschers, mit der eine verschmutzungsbedingte Leistungseinbusse vorweggenommen werden kann. Eine Alternative dazu ist die in den Abschnitten 2.3.2 und 6.2.2 beschriebene Methode, das Abwasser abzupumpen und ihm die Wärme ausserhalb der Kanalisation zu entziehen. Neuerdings werden zur Verminderung der Biofilmbildung auf dem Wärmetauscher Kupferbänder eingebaut, deren Wirksamkeit allerdings nicht erhärtet ist.

Für die Leistung von Rinnenwärmetauschern massgebend sind, abgesehen von der Verschmutzung, der Volumenstrom und die Temperatur des Abwassers (Gleichung 1 im Anhang 11.3). Beide Grössen weisen saisonale Veränderungen und einen typischen Tagesgang auf, die von der Besiedlung und Grösse des Einzugsgebiets und von meteorologischen Faktoren bestimmt sind und im Anhang in den Abschnitten 10.1 und 10.2 diskutiert werden.

### 5.3.5 Folgerungen

- Da das Abflussregime und die Qualität des Rohabwassers naturgemäss nicht beeinflusst werden können, muss stets mit einer gewissen Verschmutzung der Rinnenwärmetauscher gerechnet werden.
- Das Ausmass der Verschmutzung auf den untersuchten Rinnentauschern ist sehr unterschiedlich. Es gibt eine ganze Reihe von Anlagen, die keine spezielle Reinigung benötigen, weil die Wärmetauscherverschmutzung durch Abflussschwankungen immer wieder reduziert wird, weil schnell ein Gleichgewicht erreicht wird zwischen Ablagerung und Abschwemmung oder weil der Wärmetauscher überdimensioniert ist. Bei anderen Anlagen bilden sich auf dem Wärmetauscher derart starke Ablagerungen von Sand und Kies, dass der Wärmedurchgang drastisch eingeschränkt ist. Es empfiehlt sich daher bereits in der Planungsphase mit dem Kanalisationsbetreiber über die Standortwahl, die baulichen Gegebenheiten und die Verschmutzung im interessierenden Kanalisationsabschnitt zu sprechen. Ebenso wichtig sind Vorabklärungen über die Grösse des Volumenstroms und der Temperatur des Abwassers, sowie über deren Variabilität (Anhang 10.1 und 10.2).
- Die zeitliche Entwicklung der Verschmutzung von Rinnenwärmetauschern ist durch messtechnischen Einrichtungen in der Kanalisation schwierig zu erfassen. Sie ist einfacher indirekt zu ermitteln, indem Veränderungen der Wärmetauscherleistung aus Messdaten von Durchfluss, Vorlauf- und Rücklauf-temperatur im Zwischen- oder Kühlkreislauf bestimmt werden (Abschnitt 7.5.2).

## 6 Präventive Massnahmen zur Verminderung der Verschmutzung

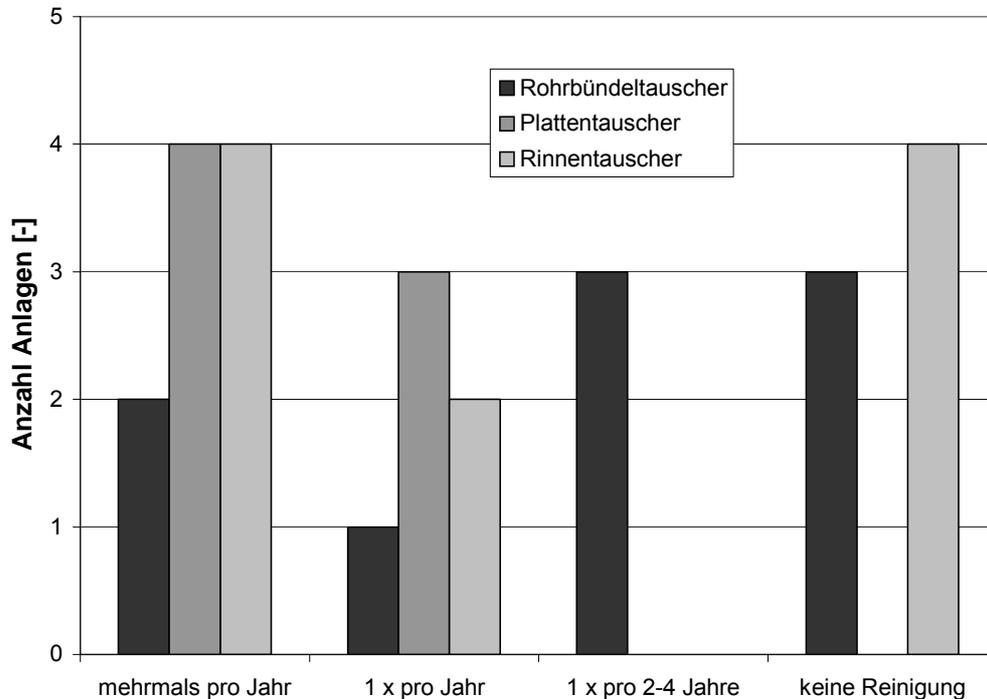
Als präventiv werden diejenigen Massnahmen bezeichnet, welche die Verschmutzung verhindern oder vermindern oder die Wärmetauscherreinigung hinauszögern oder sogar überflüssig machen. Präventive Massnahmen umfassen die passende Wahl von Anlagenkonfiguration, Wärmetauschertyp und Betriebsmodus, die ausreichend grosse Dimensionierung und allenfalls Desinfektion oder automatische mechanische Reinigung des Wärmetauschers, sowie die Abwasserbehandlung durch Vorfiltration. Präventive Massnahmen werden normalerweise bereits in der Planungsphase vorgesehen, können aber auch erst während des Betriebs einer Anlage zur Abwasserenergienutzung eingeführt werden, falls unerwartet grosse Verschmutzungsprobleme auftreten.

### 6.1 Zusammenhang zwischen Typ des Wärmetauschers und Verschmutzung

Die von den Anlagenbetreibern genannten Reinigungsintervalle für ihre Wärmetauscher (Tabellen 2, 5 und 7) sind in Abbildung 21 nochmals zusammengestellt und können als Indiz für das Ausmass der jeweiligen Verschmutzungsprobleme betrachtet werden. Allerdings ist zu beachten, dass die Wärmetauscherreinigung nicht bei allen Anlagen aufgrund eines gemessenen oder beobachteten Leistungsabfalls erfolgt, sondern bei einigen Wärmetauschern unabhängig von der effektiven Verschmutzung nach einem fixen Zeitplan vorgenommen wird. Dennoch lassen sich aus Abbildung 21 gewisse Tendenzen erkennen:

- Mehrere untersuchte Rohrbündeltauscher werden nie oder nur alle zwei Jahre gereinigt. Vor allem bei Wärmetauschern mit Abwasserführung ausserhalb der Rohrbündel treten kaum gravierende Verschmutzungsprobleme auf. Die andern nur selten gereinigten Wärmetauscher verfügen entweder über einen Vorfilter oder werden mit sauberem Kühlwasser beschickt.
- Die untersuchten Plattentauscher werden häufiger gereinigt als die anderen Wärmetauschertypen. Das Fehlen eines Vorfilters, kleine Plattenabstände und Fliessgeschwindigkeiten im Wärmetauscher können allein oder in Kombination die Bildung von Schmutzschichten begünstigen. Es ist jedoch so, dass auf mehreren Anlagen, die täglich oder wöchentlich gereinigt werden, die Reinigung präventiv erfolgt, damit gar keine nennenswerte Schmutzschicht entstehen kann.
- Bei den untersuchten Rinnentauschern ist die Häufigkeit der Reinigungsintervalle ziemlich gleichmässig verteilt. Einige Anlagen werden regelmässig gezielt gereinigt, andere nie, d.h. nur bei der normalen Reinigung der Kanalisation. Die Verschmutzung wird beeinflusst durch die baulichen Gegebenheiten im Bereich des Wärmetauschers, aber auch durch nicht kontrollierbare Grössen, wie Abflussregime und Zusammensetzung des Rohabwassers.

Es muss hier noch angemerkt werden, dass für einen umfassenden Vergleich der verschiedenen Wärmetauschertypen neben der Verschmutzungsproblematik noch andere Kriterien, wie Investitions- und Betriebskosten, sowie Energieeffizienz und Platzbedarf der Wärmetauscher einzubeziehen sind [21].



**Abbildung 21:** Praktizierte Reinigungsintervalle für die verschiedenen Wärmetauschertypen.

## 6.2 Zusammenhang zwischen Vorfiltration und Verschmutzung

### 6.2.1 Vorfiltration von gereinigtem Abwasser

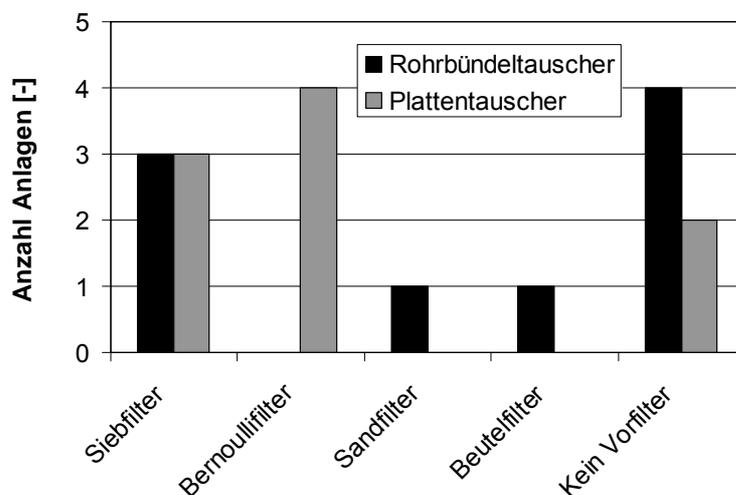
Die Aufgabe einer Vorfiltration ist es, Grobstoffe wie beispielsweise Algen und Blätterstücke, sowie Partikel bestehend aus Belebtschlamm und anorganischen Stoffen, zurückzuhalten.

Im Laufe der letzten Jahre und Jahrzehnte sind zahlreiche geeignete und wirkungsvolle Verfahren zur Vorfiltration entwickelt und von den Betreibern von Abwasserenergienutzungsanlagen eingesetzt worden. Dank einer wirkungsvollen Vorfiltration ist es gelungen, vor allem die Anlagen mit Plattenwärmetauschern, aber auch die mit Rohrbündelwärmetauschern mit vertretbarem Aufwand zu betreiben. Bis heute haben sich vor allem zwei Vorfiltrationsverfahren im praktischen Betrieb durchgesetzt, die beide auf der Siebfiltration basieren: Beim einen Verfahren wird ein Siebkorb auf einer gitterartigen Tragkonstruktion aufgespannt, welche in eine Halterung eingesetzt wird (Abbildung 22 links und Mitte). Zur Reinigung muss der Filter ausgebaut werden, weshalb immer ein Betriebsunterbruch der Anlage notwendig ist. Beim zweiten Verfahren wird ein so genannter Bernoullifilter verwendet (Abbildung 22, rechts). Dieser Filter wird während des Betriebs automatisch gereinigt, wobei das Reinigungsintervall durch eine Differenzdruckmessung oder ein vorgegebenes Zeitintervall gesteuert wird. Auf einer der untersuchten Anlagen wird ein Beutelfilter eingesetzt, auf einer Anlage ein automatisch rückspülbarer Quarzsandfilter, der zwar effektiv, aber in Betrieb und Unterhalt aufwändig ist.



**Abbildung 22:** Vorfilter in den zwei unterschiedlichen Ausführungen. Siebkorb und Halterung (links und Mitte) und Bernoullifilter (rechts).

Die Klassierung der Anlagen nach ihrem Baujahr zeigt, dass früher oft keine Vorfiltration eingebaut wurde, Siebfilter eher in älteren Anlagen zu finden sind, während Bernoullifilter in neueren Anlagen eingesetzt werden. Siebkorbfilter bei den Rohrbündelwärmetauschern werden halbjährlich bis jährlich gereinigt, der Beutelfilter monatlich. Siebkorbfilter bei Plattenwärmetauschern werden mehrmals pro Jahr und somit etwas häufiger als bei Rohrbündeltauschern gereinigt. Bernoullifilter kommen hauptsächlich bei Plattenwärmetauschern zum Einsatz, Siebkorbfilter bei Rohrbündel- und Plattenwärmetauschern (Abbildung 23).



**Abbildung 23:** Vorfiltertypen für Platten- und Rohrbündelwärmetauscher.

### 6.2.2 Vorfiltration von Rohabwasser

Dort wo dem Rohabwasser in der Kanalisation Wärme mit einem Rinnentauscher entzogen wird, ist Vorfiltration kein Thema. Wenn der Einbau eines Rinnentauschers nicht möglich ist, gibt es jedoch die Alternative, das Abwasser aus der Kanalisation abzupumpen und anschliessend durch einen Platten- oder Rohrbündelwärmetauscher zu leiten. Der Vorteil ist, dass der Wärmetauscher ausserhalb der Kanalisation, und damit leichter zugänglich platziert werden kann. Wegen der starken Verschmutzung des Rohabwassers ist die Vorfiltration bei diesem Verfahren jedoch unabdingbar.

Angewandt wird dieses Verfahren im von der Firma HUBER [5] entwickelten ThermWin® Konzept zur Wärmerückgewinnung aus Rohabwasser: Das Rohabwasser wird durch eine Öffnung im unteren Teil des Kanals zur Vorfiltrationseinheit geleitet (Abbildung 6). Diese besteht aus einem

sich selbst abreinigenden Feinfilter, welcher die Grobstoffe aus dem Abwasser entfernt. Die abgetrennten Stoffe werden mit einer Vorrichtung nach oben befördert und zusammen mit dem Abwasser aus dem Ablauf des Wärmetauschers wieder in die Kanalisation zurückgeleitet. Das filtrierte Rohabwasser wird vor dem Wärmetauscher zudem noch durch einen Bernoullifilter gereinigt.

### **6.2.3 Empfehlungen zur Vorfiltration**

- Die Vorfiltration ist bei Platten- und Rohrbündelwärmetauschern die wirkungsvollste Möglichkeit zur Prävention der Verschmutzung. Aus den Tabellen 4 und 6 ist ersichtlich wie sehr eine Vorfiltration die Reinigungsintervalle von Rohrbündel- resp. Plattenwärmetauschern reduziert.
- Beim gereinigten Abwasser wird eine Vorfiltration unabhängig von der Verfahrenstechnik der Kläranlage empfohlen, d.h. auch wenn sie über eine Filtration (4. Stufe) verfügt oder wenn für die Kläranlage verschärfte Einleitbedingungen gelten. Auch beim aus der Kanalisation abgepumpten Rohabwasser wird zusätzlich zur Abtrennung der Grobstoffe noch eine Vorfiltration empfohlen.
- Bei Rohrbündelwärmetauschern können Siebkorbfilter eingesetzt werden. Diese sind einfach aufgebaut, müssen aber periodisch manuell gereinigt werden, was kurze Betriebsunterbrüche nötig macht. Bei der Abwasserführung ausserhalb der Rohrbündel können Rohrbündelwärmetauscher allenfalls auch ohne Vorfiltration betrieben werden. Bei Plattenwärmetauschern werden heute fast ausschliesslich sich automatisch rückspülende Bernoullifilter eingesetzt. Diese Filter ermöglichen einen unterbrochslosen Betrieb der Anlage, verlangen aber eine Zusatzinvestition für die Abreinigung mit Druckluft.

## **6.3 Betriebsparameter mit Einfluss auf die Verschmutzung**

### **6.3.1 Kontinuierlicher und diskontinuierlicher Abwasservolumenstrom**

Platten- und Rohrbündelwärmetauscher können kontinuierlich oder diskontinuierlich mit Abwasser beschickt werden. Bei diskontinuierlicher Beschickung wird der Durchfluss abgestellt, wenn dem Abwasser keine Wärme entzogen wird. Dieser Betriebsmodus kommt auf vielen Anlagen zur Anwendung.

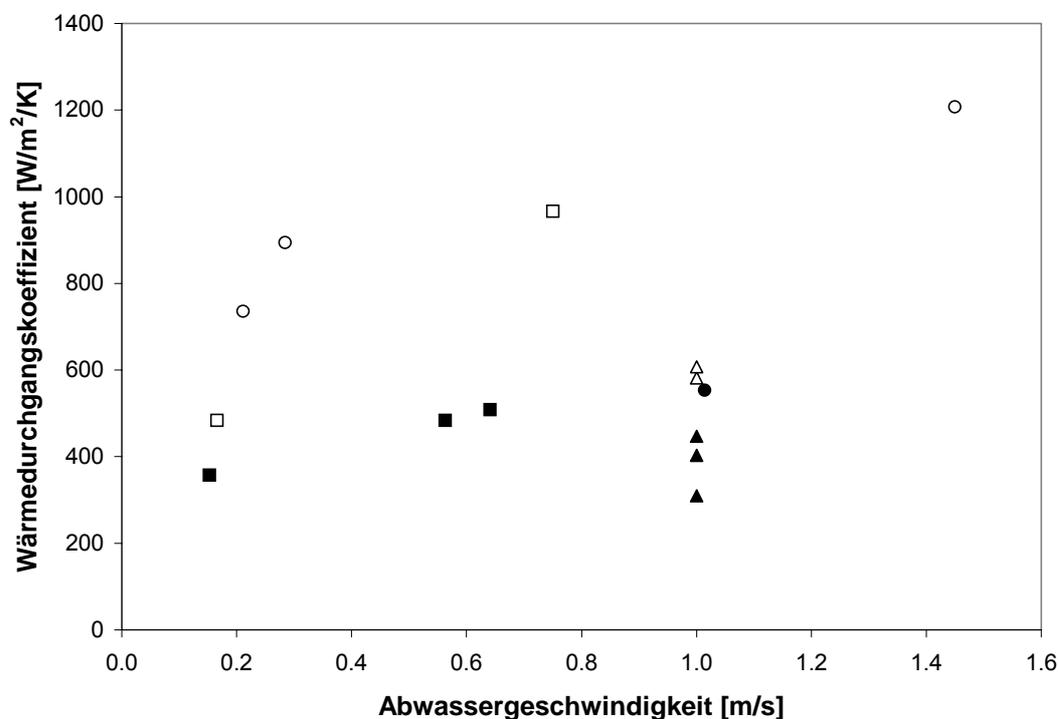
Es ist allerdings allgemein bekannt, dass längere Stillstandszeiten zu verstärktem Biofilmbewuchs führen können, was sich auch in den Erfahrungen von Betreibern der untersuchten Anlagen widerspiegelt:

- Zwei Betreiber können die Verschmutzung des Wärmetauschers nur in Grenzen halten, wenn er dauernd von Abwasser durchströmt wird.
- Der Betreiber eines Plattenwärmetauschers kehrt ein- oder zweimal täglich die Strömungsrichtung im Wärmetauscher um und erreicht dadurch eine Verminderung der Verschmutzung.
- Mehrere Betreiber füllen den Wärmetauscher während längeren Betriebsunterbrüchen mit Trinkwasser um der Verschmutzung entgegenzuwirken.

### **6.3.2 Strömungsgeschwindigkeit des Abwassers**

Auch die Geschwindigkeit, mit der das Abwasser über die Wärmetauscheroberfläche strömt, hat einen Einfluss auf die Biofilmbildung. Durch grössere Geschwindigkeiten und Turbulenz wird das Biofilmwachstum begrenzt, während lokale Bereiche mit reduzierter Strömungsgeschwindigkeit oder Totwasserzonen Ansatzpunkte für die Biofilmbildung darstellen und Ablagerungen begünstigen [18].

Für die untersuchten Rohrbündelwärmetauscher wurden Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 0,21 m/s und 1,45 m/s berechnet, für die Plattenwärmetauscher Geschwindigkeiten zwischen 0,15 m/s und 0,75 m/s. Diese Unterschiede tragen wahrscheinlich auch dazu bei, dass die praktizierten Reinigungsintervalle bei den Plattenwärmetauschern kürzer sind als bei den Rohrbündelwärmetauschern. In Abbildung 24 sind für die verschiedenen Wärmetauschertypen die Wärmedurchgangskoeffizienten in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit des Abwassers im Wärmetauscher aufgetragen. Die Abbildung weist auf die Abhängigkeit der Wärmetauscherleistung von der Fließgeschwindigkeit hin und auf tendenziell tiefere Wärmedurchgangskoeffizienten der Rinnenwärmetauscher gegenüber den Rohrbündel- und Plattenwärmetauschern.



**Abbildung 24:** Zusammenhang zwischen Wärmedurchgangskoeffizient und Fließgeschwindigkeit des Abwassers im Wärmetauscher für gereinigte (helle Symbole) und verschmutzte (dunkle Symbole) Rohrbündel- (Kreise), Platten- (Quadrate) und Rinnenwärmetauscher (Dreiecke).

Für die Kanalisation werden in der SIA Norm 190 minimale Fließgeschwindigkeiten zur Verhinderung der Verschlammung angegeben [22]. Danach soll in Kanälen mit einem Innendurchmesser von mehr als einem Meter die minimale Fließgeschwindigkeit 1,0 m/s betragen [17]. Da die Fließgeschwindigkeit in der Kanalisation starken Schwankungen unterworfen ist, wurde für Abbildung 24 der Minimalwert verwendet. Da die Fließgeschwindigkeit vor allem vom Gefälle und von der Rauigkeit des Kanals bestimmt wird, ist es aus Sicht der Verschmutzungsprävention günstig, wenn das Gefälle im Bereich des Wärmetauschers möglichst gross ist.

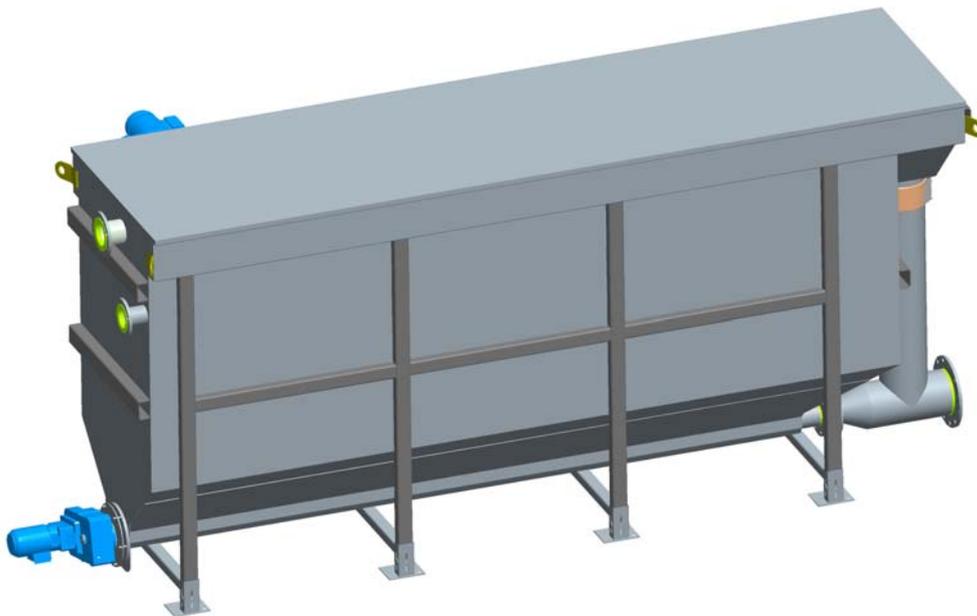
#### 6.4 Desinfektion des Wärmetauschers

Das Ziel der Desinfektion des Wärmetauschers ist es, das Einwachsen von Biofilm soweit zu reduzieren, dass eine Reinigung verzögert werden oder sogar ausbleiben kann. Das in kurzen Zeitintervallen angewandte präventive chemische Reinigungsverfahren wird im Abschnitt 7.3.3 näher beschrieben. Der Vorteil des Verfahrens ist die Möglichkeit der Automation und dem damit verbundenen geringen Aufwand für den Betreiber. Nachteile sind die etwa einstündige

Einstellung der Wärmegewinnung und die mit der Installation der Einrichtung verbundenen Kosten.

## 6.5 Automatische mechanische Wärmetauscherreinigung

Bei dem in Abbildung 25 gezeigten Rohrbündelwärmetauscher, der eigens für die Abwasserwärmenutzung entwickelt worden ist, wird die abwasserseitige Wärmetauscherfläche präventiv mechanisch gereinigt [5]. Die Abwasserführung erfolgt ausserhalb der Rohre, von deren Oberfläche die Verschmutzungen durch periodisch den Rohren entlang geführte Manschetten abgestreift werden. Feststoffe, die auf den Behälterboden absinken, werden periodisch durch eine automatische Einrichtung wieder in den ablaufseitigen Abwasserstrom zurückgeführt.



**Abbildung 25:** Für Anwendungen im Abwasserbereich entwickelter Rohrbündelwärmetauscher mit eingebauter automatischer mechanischer Reinigung [5].

## 6.6 Dimensionierung des Wärmetauschers

Eine weitere präventive Massnahme besteht darin, den Wärmetauscher grösser zu dimensionieren als nötig. Auf diese Weise wird ein allfälliges Verschmutzungsproblem entschärft, indem eine Leistungsreduktion des Wärmetauschers durch Verschmutzung zum Vorneherein einberechnet wird, allerdings zum Preis erhöhter Investitionskosten. Die Massnahme kommt vor allem bei Rinnenwärmetauschern zur Anwendung. Bei Wärmetauschertypen, bei denen die Verschmutzung eine starke Abnahme des Durchflusses nach sich ziehen kann, bringt die Überdimensionierung wenig.

## 6.7 Folgerungen

- Wärmetauscher, die mit Abwasser betrieben werden, weisen immer eine mehr oder weniger starke Verschmutzung auf. Es ist daher sinnvoll, dem Verschmutzungsproblem und seinen Auswirkungen bereits bei der Planung von Anlagen zur Abwasserenergienutzung Aufmerksamkeit zu schenken.

- Durch die Wahl des Typs des Wärmetauschers, dessen konstruktive Auslegung und Anordnung, sowie den vorgesehenen Betriebsmodus der Anlage kann massgeblich Einfluss genommen werden auf die Verschmutzung.
- Eine Überdimensionierung des Wärmetauschers stellt sicher, dass er die erwartete Leistung trotz Verschmutzung erbringt.
- Durch die Abtrennung von Partikeln, Algen und weiteren Grobstoffen durch einen Vorfilter wird die Verschmutzung von Platten- und Rohrbündelwärmetauschern deutlich reduziert.
- Eine Einrichtung für eine periodische automatische Desinfektion vermindert oder verhindert das Biofilmwachstum in Platten- und Rohrbündelwärmetauschern weitgehend. Vorfiltration und Desinfektion können auch noch realisiert werden, falls sich Probleme mit der Wärmetauscherverschmutzung ergeben sollten.

## 7 Reinigung von Wärmetauschern

### 7.1 Übersicht der Reinigungsmethoden

Bei der Mehrzahl der untersuchten Anlagen wird der Wärmetauscher von Zeit zu Zeit gereinigt, die Reinigungsmethoden unterscheiden sich aber je nach Wärmetauschertyp. In Abbildung 26 ist für die untersuchten Wärmetauschertypen die Bedeutung der verschiedenen angewandten Reinigungsmethoden grafisch dargestellt. Mechanische Reinigung und Spülung mit sauberem Wasser wird bei allen Wärmetauschertypen benutzt. Automatische Reinigungssysteme gibt es ebenfalls für alle Wärmetauschertypen; sie wurden im Rahmen dieser Untersuchung aber nur bei einer Anlage mit Plattenwärmetauscher gefunden. Hochdruckspülung wird fast überall für Rinnenwärmetauscher verwendet, chemische Spülung bei Rohrbündel- und vor allem bei Plattenwärmetauschern.

Wärmetauscher	mechanische Reinigung	Hochdruckspülung	Wasserspülung	chemische Spülung	automatische Reinigung
Rohrbündel	●	●	●	●●	
Platten	●●		●	●●	●
Rinnen	●	●●	●		

Abbildung 26: Bedeutung verschiedener Reinigungsarten für die untersuchten Wärmetauschertypen.

### 7.2 Reinigung von Rohrbündelwärmetauschern

Von den neun untersuchten Rohrbündeltauschern wird gemäss Tabelle 2 einer mechanisch, einer mit sauberem Wasser und einer mit Druckspülung gereinigt, drei werden mit chemischer Spülung und drei werden nicht gereinigt.

#### 7.2.1 Mechanische Reinigung

Bei der mechanischen Reinigungsmethode, die auf der Anlage RB4 angewandt wird, werden dem Abwasser schaumstoffähnliche Kügelchen zugegeben und durch die Rohre des Wärmetauschers gepumpt. Da der Durchmesser der Kügelchen geringfügig grösser ist als der Rohrdurchmesser, werden die Wände der Rohre durch die Reibung gereinigt. Während der Reinigung wird der Abwasserstrom auf einen geschlossenen Kreislauf umgeschaltet, so dass die Kügelchen nach erfolgter Reinigung mit einem Lochblech wieder aufgefangen und dem Abwasserstrom entnommen werden können.

Das auf der Anlage angewandte System stammt von der Taprogge GmbH [23]. Der untersuchte Wärmetauscher wird damit einmal im Monat gereinigt, wodurch seit Jahren ein stabiler Betrieb der Anlage gewährleistet ist.

## 7.2.2 Druckspülung

Der Rohrbündelwärmetauscher der Anlage RB1 wird mit Druck durchgespült. Dazu wird ein vom Betreiber selber entwickeltes Verfahren verwendet, bei dem eine etwa vier Meter lange Lanze, deren Spitze kleine Löcher aufweist, in die einzelnen Rohre eingeführt wird. Die Lanze wird mit einem Schlauch an die Trinkwasserleitung angeschlossen, und der Wasserfluss aus dem Lanzenkopf über ein Ventil gesteuert. Durch den hohen Druck des am Lanzenkopf austretenden Wasserstrahls werden die lokalen Verschmutzungen von der Rohrwand abgelöst.

## 7.2.3 Spülung mit Wasser

Bei der Anlage RB5 wird Trinkwasser unter erhöhtem Druck durch den Wärmetauscher gepumpt. Während bei der Reinigung mittels Spüllanze der Deckel des Wärmetauschers entfernt werden muss, kann die Spülung hier ohne Demontage des Wärmetauschers erfolgen. Bei beiden Methoden muss der Wärmetauscher jedoch vom Abwasserstrom abgekoppelt werden.

## 7.2.4 Chemische Spülung

Die chemische Spülung ist für die untersuchten Rohrbündelwärmetauscher die am häufigsten praktizierte Reinigungsmethode. Die auf den Anlagen RB6, RB7 und RB9 angewandte Methode hat den Vorteil, dass der Wärmetauscher wie bei der Spülung mit sauberem Wasser nicht aufgeschraubt werden muss. Er muss aber auch hier vom Abwasserkreislauf abgekoppelt werden, damit die Reinigungsflüssigkeit durch die Rohre gepumpt werden kann. Bei kleinen Wärmetauschern ist die chemische Spülung relativ einfach zu bewerkstelligen, und es wird dafür nur eine Pumpe und ein Fass mit der Spüllösung benötigt. Am wirkungsvollsten funktioniert die chemische Spülung, solange noch keine Verstopfungen im Innern des Wärmetauschers vorhanden sind.

Die der Spüllösung beigefügten Reinigungsmittel sind von entscheidender Bedeutung und können wie folgt gruppiert werden:

- Säuren und Basen
- Javelwasser und Wasserstoffperoxid
- Dispergierende und fettlösende Mittel

Oft wurden die Reinigungsmittel, mit denen die Verschmutzung wirksam bekämpft werden konnte, von den Anlagenbetreibern selbst ermittelt, und diese führen die chemische Spülung auch selber durch. Wird die Reinigung des Wärmetauschers durch externe Fachleute vorgenommen, müssen diese meistens ebenfalls Testläufe durchführen, um eine wirksame Zusammensetzung des Reinigungsmittels zu finden. Von mehreren Anlagenbetreibern wird allerdings berichtet, dass die durchgeführte chemische Spülung ineffektiv war, wobei unklar ist, ob dafür ein falsch gewähltes Reinigungsmittel, speziell problematische Wasserinhaltsstoffe oder Veränderungen in der Abwasserzusammensetzung verantwortlich waren.

Die früher in einigen Fällen falsche Auswahl der Reinigungsmittel, Verwendung von nicht genügend verdünnten Spüllösungen und falsche Abfolge der Reinigungsprozedur hatte teilweise massive Probleme zur Folge, die bis zur Zerstörung der Wärmetauscher gingen. Die meisten Probleme traten auf, wenn nach der Säurespülung nicht mit einer Base neutralisiert wurde. Infolge der Kapillarwirkung blieben so in den Kontaktstellen der Metalle Säurereste zurück, die zu Korrosion führten.

Der Zeitaufwand für die Reinigungsprozedur ist von der Grösse des Wärmetauschers abhängig. Bei kleineren Anlagen kann mit einem Aufwand von rund zwei Stunden gerechnet werden, während er bei grösseren Anlagen einen halben Tag oder mehr betragen kann.

## 7.2.5 Empfehlungen

- Die Spülung mit Wasser ist die einfachste Reinigungsmethode, weil dafür der Wärmetauscher nicht aufgeschraubt werden muss. Die Methode kann uneingeschränkt empfohlen werden, ist allerdings nicht in jedem Fall ausreichend um die Verschmutzung vollständig zu beseitigen.
- Die chemische Spülung ist bei passender Wahl der Reinigungsmittel wirkungsvoll. Allerdings ist sie in der Handhabung aufwändiger als die Spülung mit Wasser, weil die Spüllösungen richtig dosiert werden müssen und bei der Verwendung von Säure immer ein Neutralisationsschritt erforderlich ist, damit die Kontaktstellen der Metalle nicht von Säureresten angegriffen werden. Es wird deshalb empfohlen, sich mit erfahrenen Fachleuten zu beraten oder die Reinigung von spezialisierten Firmen durchführen zu lassen.
- Die Druckspülung mittels Drucklanze ist sehr wirkungsvoll, ist aber auch aufwändiger als die Spülung mit Wasser, weil der Wärmetauscher an der Stirnseite der Rohre geöffnet werden muss.
- Die mechanische Reinigung von Rohrbündeltauschern ist schwierig, da die Innenseiten der Rohre schlecht zugänglich sind. Ob das in Abschnitt 7.2.1 beschriebene System auch für kleine Wärmetauscher wirtschaftlich anwendbar werden kann, ist unklar. Insgesamt betrachtet spielt die mechanische Reinigung bei Rohrbündelwärmetauschern keine zentrale Rolle.

## 7.3 Reinigung von Plattenwärmetauschern

Alle der neun untersuchten Plattentauscher werden gemäss Tabelle 5 gereinigt, vier mechanisch und mit Wasser, vier durch chemische Spülung und eine Anlage durch ein automatisches Reinigungssystem. Allerdings haben mehrere Betreiber die Reinigungsmethode auch schon gewechselt im Bestreben die für ihre Anlage optimale Lösung zu finden.

### 7.3.1 Mechanische Reinigung

Die bei den Plattentauschern der Anlagen PT3, PT4, PT6 und PT8 angewandte mechanische Methode ist die Reinigung mit Schwamm oder Bürste. Dabei werden die Verschmutzungen auf schonende Art und Weise von der Oberfläche der einzelnen Platten gelöst und danach abgewaschen. Es gilt jedoch zu beachten, dass die Reinigung erfolgen muss, solange die Verschmutzungen feucht sind.

Die mechanische Reinigung hat den Vorteil hoher Wirksamkeit, ist aber zeitintensiv, wenn der Wärmetauscher demontiert werden muss, vor allem wenn die Anlage über einen mit Glykol angereicherten Zwischenkreislauf verfügt. Die Betreiber geben den Zeitbedarf für die Demontage und mechanische Reinigung mit ein bis zwei Manntagen an. Auf der Anlage PT4 wird der Wärmetauscher nicht vollständig zerlegt, sondern die Platten werden nur soweit auseinander geschoben, dass sie nacheinander einzeln abgebürstet werden können. Auf der Anlage PT3, die über einen von oben zugänglichen speziellen Wärmetauscher mit 4 cm Plattenabstand verfügt (Abbildung 16), werden die Platten einmal wöchentlich mit einem Wasserschlauch abgespritzt und alle drei bis vier Monate mit einer Bürste gereinigt.

### 7.3.2 Chemische Spülung

Die chemische Spülung ist die häufigste Reinigungsart bei Plattenwärmetauschern und wird auf den untersuchten Anlagen PT1, PT2, PT7 und PT9 angewandt. Sie wird gleich wie bei den Rohrbündelwärmetauschern durchgeführt, indem der Abwasserstrom vom Wärmetauscher abgekoppelt wird, und anschliessend eine Reinigungsflüssigkeit durch den Wärmetauscher gepumpt wird (Abbildung 27). Auch in Bezug auf die verwendeten Reinigungsmittel und die möglichen Probleme, die bei der chemischen Spülung auftreten können, gelten die im Abschnitt 7.2.4 gemachten Aussagen. Der Zeitaufwand für die chemische Reinigung wird von den Anlagenbetreibern mit vier bis acht Stunden angegeben.



**Abbildung 27:** Vorrichtungen für die chemische Spülung, die von den Betreibern der Anlagen PT9 (links) und PT1 (rechts) selber entwickelt worden sind.

### 7.3.3 Automatische Reinigung

Bei der automatischen Reinigung handelt es sich ebenfalls um eine chemische Spülung. Im Unterschied zu der im letzten Abschnitt beschriebenen Reinigungsart ist hier die Spüleinrichtung jedoch fest installiert und das Umschalten zwischen Abwasserstrom und Spüllösung, sowie die Durchführung der Reinigungsprozedur, erfolgt automatisch. Dadurch ist es möglich, den Vorgang in sehr kurzen, festen Zeitintervallen ablaufen zu lassen und damit präventiv auf die Biofilmbildung auf dem Wärmetauscher einzuwirken.

Die automatische Reinigung wird auf der im Abschnitt 2.3.3 beschriebenen Anlage angewandt. Zurzeit läuft eine einjährige Versuchsphase, in der die optimalen Bedingungen für den Einsatz der Reinigungsprozedur ermittelt werden sollen. Erste Erfahrungen haben dazu geführt, dass das Spülintervall auf einen Monat verlängert wurde. Als Reinigungsmittel werden ein Biotensid, ein Biocid und ein Entschäumer eingesetzt [24].

### 7.3.4 Empfehlungen

- Die chemische Spülung ist bei richtiger Wahl und Anwendung der Reinigungsmittel eine wirkungsvolle Methode zur Bekämpfung der Biofilmbildung in Plattenwärmetauschern. Die im Abschnitt 7.2.5 abgegebenen Empfehlungen für Rohrbündeltauscher haben auch hier Gültigkeit.
- Durch die automatische Reinigung wird die Wirksamkeit der chemischen Spülung noch erhöht. Die Anwendung der Methode ist aber mit zusätzlichen Investitionskosten verbunden und daher eher für grössere Anlagen geeignet.
- Die mechanische Reinigung von Plattenwärmetauschern ist wirkungsvoll, aber auch sehr arbeitsaufwändig. Sie ist deshalb nur für Anlagen zu empfehlen, die bloss in grösseren Zeitabständen gereinigt werden müssen.
- Die Spülung mit Wasser wäre die einfachste Reinigungsmethode für Plattentauscher. Die Betreibererfahrungen in Bezug auf die Wirksamkeit der Methode sind aber eher negativ.

## 7.4 Reinigung von Rinnenwärmetauschern

Von den zehn untersuchten Rinnenwärmetauschern werden gemäss Tabelle 7 sechs gereinigt, davon zwei mechanisch, drei mit Hochdruckspülung und einer mit Schwallspülung. Die vier anderen Rinnentauscher werden nur im Zug der normalen Kanalreinigung gesäubert.

### 7.4.1 Mechanische Reinigung

Eine mechanische Reinigung wird bei zwei der untersuchten Anlagen praktiziert. Die Anlage RT1 wird zweimal jährlich mit einem Besen gereinigt. Dies ist möglich, weil die Anlage sehr klein ist, und der Rinnentauscher mit einer Fläche von 10,6 m<sup>2</sup> sehr gut zugänglich ist. Die Reinigungsmethode ist einfach und führt zu einem signifikanten Anstieg der Wärmetauscherleistung (Abschnitt 5.3.2).

Auf dem Wärmetauscher der Anlage RT3 bilden sich relativ häufig grössere Sandablagerungen. Wenn der Sand nicht mehr mit einem Besen entfernt werden kann, werden die Ablagerungen mit einem Fahrzeug der Kanalreinigung abgesaugt, was etwa einmal im Monat geschieht. Auch diese Anlage hat einen sehr kleinen Rinnenwärmetauscher mit einer Fläche von 13 m<sup>2</sup>, der gut zugänglich ist.

### 7.4.2 Hochdruckspülung

Die Rinnenwärmetauscher der Anlagen RT5, RT7 und RT9 werden mittels Hochdruckspülung mit Wasser gereinigt. Bei den Anlagen RT7 und RT9 geschieht dies im Rahmen der üblichen Kanalreinigung durch den Betreiber der Kanalisation. Dabei wird der Kanal mit einer Hochdrucklanze, die zwischen zwei Schächten durch den Kanal geführt wird, gesäubert. Bei der Anlage RT5 bilden sich auf dem Wärmetauscher jedoch derart starke Kies- und Sandablagerungen, dass an seiner Oberfläche praktisch keine Strömung und kein Wärmedurchgang mehr vorhanden ist, und der Wärmetauscher im Winter einmal pro Monat mit einer Hochdruckspülung gereinigt werden muss. Für eine mechanische Reinigung ist der Durchmesser des Kanalisationsrohrs zu klein.

### 7.4.3 Schwallspülung

Eine weitere Möglichkeit zur Reinigung von Rinnenwärmetauschern besteht in der sogenannten Schwallspülung. Dabei wird ein Teil des Abwassers in der Kanalisation vor dem Wärmetauscher aufgestaut. Durch das Auslösen einer Klappe entsteht eine Hochwasserwelle im Kanal, welche die Verschmutzung auf dem Wärmetauscher abtragen soll. Die Anlage RT10 verfügt über eine Einrichtung zur Schwallspülung.

### 7.4.4 Empfehlungen

- Die Hochdruckspülung ist für Rinnenwärmetauscher die Methode der Wahl. Ihre Anwendung erfolgt durch den Kanalnetzbetreiber
  - im Turnus der normalen Reinigung des Abwasserkanals
  - gemäss einem mit dem Betreiber der Wärmenutzungsanlage vereinbarten Intervall, oder
  - auf Verlangen bei einem Einbruch der Wärmetauscherleistung.
- Für die mechanische Reinigung ist eine gute Zugänglichkeit zum Wärmetauscher Voraussetzung. Da die Besenreinigung sehr einfach und wirkungsvoll ist, kann diese Methode zumindest bei kleinen Anlagen empfohlen werden.
- Die Schwallspülung stellt eine grundsätzlich interessante Möglichkeit der Wärmetauscherreinigung dar. Die Wirksamkeit der Schwallspülung zur Kanalreinigung ist zwar schon aufgezeigt worden, es ist aber unklar, inwieweit diese Methode auch zur

Verminderung oder Verhinderung der Verschmutzung von Rinnentauschern eingesetzt werden kann.

## 7.5 Auslösung der Reinigung

### 7.5.1 Kriterien für die Wärmetauscherreinigung

In Tabelle 8 ist für die verschiedenen Anlagentypen aufgelistet, nach welchen Kriterien die Reinigung der untersuchten Wärmetauscher ausgelöst wird. Die Differenz zwischen der Anzahl aufgelisteter und untersuchter Anlagen rührt daher, dass für einige nicht näher untersuchte Anlagen diese Kriterien ebenfalls bekannt sind.

**Tabelle 8:** Für die Auslösung der Wärmetauscherreinigung angewandte Kriterien

Kriterium	Anzahl Anlagen		
	RB	PT	RT
Durchflussverminderung		4	
Druckabfall	4	1	
Temperaturdifferenz		4	
Wärmetauscherleistung	2		2
Betreibererfahrung	4	2	4
Kanalnetzreinigung			4

Die ersten vier der in Tabelle 8 angegebenen Kriterien für das Auslösen der Wärmetauscherreinigung basieren auf Messdaten. Gemessen werden der Volumenstrom des Abwassers im Wärmetauscher, der Druckabfall und die Temperaturdifferenz im Abwasser zwischen Zu- und Ablauf des Wärmetauschers, die Rücklauf Temperatur im Kühl- oder Zwischenkreislauf oder die Wärmetauscherleistung. Wenn diese Messgrößen einen vorgegebenen kritischen Wert erreichen, ist dies für den Anlagenbetreiber ein Hinweis auf die Fälligkeit einer Wärmetauscherreinigung. Bei der Mehrzahl der Rohrbündeltauscher (RB), bei den meisten Plattentauschern (PT), aber nur bei wenigen Rinnentauschern (RT) wird die Reinigung aufgrund von Messdaten vorgenommen. Dieser Sachverhalt kann damit erklärt werden, dass in den letzten Jahren bei neuen Anlagen vermehrt Plattenwärmetauscher eingebaut und Prozessleitsysteme eingesetzt wurden, von denen Messdaten online erfasst und abgespeichert werden.

Bei einer beträchtlichen Anzahl Anlagen basiert die Auslösung der Reinigung auf der Erfahrung der Betreiber, von denen allerdings mehrere ihre Anlagen präventiv reinigen, d.h. ohne dass eine massgebliche Beeinträchtigung der Wärmetauscherleistung bereits festgestellt worden ist. Bei vier Rinnentauscheranlagen wird die Festlegung des Reinigungsintervalls dem Kanalisationsbetreiber überlassen. Diese Feststellung verdeutlicht, dass die Verschmutzungsproblematik bei Rinnentauschern nicht den gleich grossen Stellenwert hat wie bei Röhren- und Plattentauschern. Dazu passt die Aussage von Anlagenbetreibern mit Rinnenwärmetauschern, dass die verschmutzungsbedingte Leistungseinbusse bereits bei der Dimensionierung ihres Wärmetauschers vorweggenommen wurde.

### 7.5.2 Messtechnische Einrichtungen zur Planung der Reinigung

Um die Reinigungsintervalle optimal planen zu können wird empfohlen, die Leistung des Wärmetauschers durch Messungen zu erfassen und zu dokumentieren. Bei den langsam und kontinuierlich ändernden Größen wie Abwasservolumenstrom oder Differenzdruck kann eine wöchentliche Messung ausreichen. Bei anderen Größen aber, die leistungsabhängig sind und daher kurzzeitig stark schwanken können, ist eine laufende Erfassung und elektronische Aufzeichnung der Messdaten zur Überwachung der Wärmetauscherverschmutzung sinnvoll. Bei der Auswertung und Interpretation der Messwerte ist darauf zu achten, dass die Daten bei

vergleichbaren Betriebszuständen bezüglich Durchfluss im Zwischen- oder Kühlkreislauf, Leistungsstufe der Kompressoren, usw. erhoben wurden.

Die einfachste Methode um die Entwicklung der Verschmutzung von Platten- und Rohrbündeltauschern zu erfassen, ist die Messung des Druckverlusts über den Wärmetauscher. Gleichwertig dazu, aber teurer, ist die Messung des Abwasservolumenstroms im Wärmetauscher. Eine Alternative ist die Messung der Abwassertemperatur im Zu- und Ablauf des Wärmetauschers sowie der Vorlauf- und Rücklauf-temperatur im Zwischen- oder Kühlkreislauf. Aus diesen Temperaturen kann eine Temperaturdifferenz  $\Delta T_{WT}$  berechnet werden (Gleichung 4 oder 5 im Anhang 11.3), die sich mit der Zunahme der Wärmetauscherverschmutzung vergrößert.

Bei Rinnenwärmetauschern kann auf dieselbe Weise aus der Abwassertemperatur und der Vorlauf- und Rücklauf-temperatur im Zwischen- oder Kühlkreislauf die Temperaturdifferenz  $\Delta T_{WT}$  berechnet werden, deren Vergrößerung die Zunahme der Wärmetauscherverschmutzung anzeigt.

## 8 Schlussfolgerungen

Wärmerückgewinnung aus Abwasser ist ökologisch sinnvoll, technisch auf verschiedenste Arten realisierbar und kann auch wirtschaftlich sein. Voraussetzungen für die erfolgreiche Realisierung sind eine sorgfältige Abklärung der gegebenen Randbedingungen in der Planungsphase und eine enge Zusammenarbeit der involvierten Fachdisziplinen in der Realisierungsphase.

Die Verschmutzung der Wärmetauscher ist ein unvermeidliches Phänomen und ein wichtiger Faktor für den Betrieb von Wärmerückgewinnungsanlagen. Deshalb ist es wesentlich, dass die Auslegung der Anlage und die Wahl des Wärmetauschers so geplant werden, dass technische Vorkehrungen und betriebliche Massnahmen ergriffen werden können, falls auftretende Verschmutzungsprobleme den Betrieb der Anlage beeinträchtigen.

Für das Ausmass der Wärmetauscherverschmutzung ist hauptsächlich die Konzentration der Abwasserinhaltsstoffe verantwortlich, daneben noch das Durchfluss- oder Abflussregime und die Geometrie der Wärmetauscher. Da die Abwasserzusammensetzung im Normalfall nicht bekannt ist und sich im Lauf der Zeit auch ändern kann, ist das Ausmass der Verschmutzung nicht vorhersagbar.

Die Auswirkungen der Verschmutzung sind bei Rohrbündel- und Plattenwärmetauschern eine steigende Druckdifferenz und ein sinkender Volumenstrom des Abwassers im Wärmetauscher. Bei allen Wärmetauschertypen reduziert die Schmutzschicht den Wärmedurchgang durch die Tauscherwand und somit die Wärmetauscherleistung im schlimmsten Fall um bis zu 60%. Die Wärmetauscherleistung lässt sich indes aufrechterhalten, wenn es möglich ist durch Erhöhung der Antriebsenergie der Wärmepumpe die Rücklauftemperatur im Zwischen- oder Kühlkreislauf genügend weit abzusenken.

Präventive Massnahmen gegen die Verschmutzung von Rohrbündel- und Plattenwärmetauschern sind in erster Linie die Vorfiltration des Abwassers, dann die Vermeidung von Stillstandzeiten und Totwasserzonen, sowie fest installierte Einrichtungen, die den Wärmetauscher in kurzen Zeitintervallen mechanisch oder mit einer Spüllösung automatisch reinigen und so die Verschmutzung verhindern. Bei Rinnentauschern kann durch eine Vergrösserung des Gefälles im Bereich des Wärmetauschers die Ablagerung von Grobstoffen vermindert und deren Abschwemmung bei Regenereignissen gefördert werden.

Massnahmen um die Auswirkungen der Verschmutzung zu begrenzen, sind die aussen liegende Abwasserführung bei Rohrbündelwärmetauschern, nicht zu kleine abwasserseitige Durchflussquerschnitte und Fliessgeschwindigkeiten bei Rohrbündel- und Plattentauschern und eine grosszügige Dimensionierung der Wärmetauscherfläche bei allen Wärmetauschertypen.

Für die Reinigung verschmutzter Wärmetauscher stehen mehrere Methoden zur Verfügung. Für Rohrbündel- und Plattenwärmetauschern ist die chemische Spülung erste Wahl, weil die mechanische Reinigung und Druckspülung meist eine aufwändige Zerlegung des Wärmetauschers bedingt und das blosses Spülen mit Wasser manchmal nicht wirksam genug ist. Rinnenwärmetauscher lassen sich am einfachsten durch eine Hochdruckspülung reinigen, weil der Zugang für die mechanische Reinigung meist nicht möglich und die Wirksamkeit der Schwallspülung nicht immer gegeben ist.

Da es nicht möglich ist das Ausmass der Verschmutzung vorherzusagen, wird für die optimale Planung und Durchführung der Wärmetauscherreinigung empfohlen, die Grössen, die das Ausmass der Verschmutzung anzeigen, wie die Druckdifferenz und der Volumenstrom des Abwassers im Wärmetauscher oder die Temperaturdifferenz zwischen Abwasser und Zwischen- oder Kühlkreislauf, zu messen und allenfalls aufzuzeichnen. Dies ermöglicht gleichzeitig auch eine Erfolgskontrolle der Wärmetauscherreinigung.

## 9 Literatur

- [1] Wanner Oskar, Panagiotidis Vassileios, Siegrist Hansruedi (2004): Wärmeentnahme aus der Kanalisation – Einfluss auf die Abwassertemperatur. Korrespondenz Abwasser 51/5, S. 489-495.
- [2] Gutzwiller Stephan, Rigassi Reto, Eicher Hanspeter (2008): Abwasserwärmenutzung - Potenzial, Wirtschaftlichkeit und Förderung. Schlussbericht Projekt Nr. 101722. Bern: Bundesamt für Energie BFE. URL: <http://www.energieforschung.ch/> [Stand 3.3.2009].
- [3] Wanner Oskar, Steiner Michele (2007): Umfrage Abwasserwärmenutzung - Erste Ergebnisse. Zwischenbericht. Dübendorf: Eawag.
- [4] FEKA Energiesysteme AG, Bad Ragaz. URL: <http://www.feka.ch/> [Stand 4.3.2009].
- [5] Picatech Huber AG, Kriens. URL: <http://www.picatech.ch/> [Stand 4.3.2009].
- [6] Gründler Alfred (2005): Wärmenutzung aus der Kanalisation zur Beheizung und Kühlung der Uhrenfabrik IWC mittels Wärmepumpe. Schlussbericht Projekt Nr. 44517. Bern: Bundesamt für Energie BFE. URL: <http://www.energieforschung.ch/> [Stand 3.3.2009].
- [7] Betscha Eugen (2005): Nutzung von Abwasser-Wärme aus der ARA Uster mittels kalter Fernwärme. Schlussbericht DIS-Projekt Nr. 35246. Bern: Bundesamt für Energie BFE. URL: <http://www.energieforschung.ch/> [Stand 3.3.2009].
- [8] Deiss Christoph (2007): Energiequelle zum Heizen und Kühlen. Gas Wasser Abwasser 6, S. 413-420.
- [9] Müller Ernst A, Schmid Felix (2005): Heizen und Kühlen mit Abwasser – Ratgeber für Bauherrschaften und Gemeinden. Bern: Bundesamt für Energie BFE. URL: <http://www.bfe.admin.ch/infrastrukturanlagen/> [Stand 3.3.2009].
- [10] Müller Ernst A, Schmid Felix, Stodtmeister Wolfram, Kobel Beat (2005): Heizen und Kühlen mit Abwasser – Ratgeber für Bauherren und Kommunen. Osnabrück: Deutsche Bundesstiftung Umwelt DBU. URL: <http://www.dbu.de/> [Stand 3.3.2009].
- [11] Schmid Felix (2007): Wärmerückgewinnung aus Abwasser. Gas Wasser Abwasser 6, S. 405-411.
- [12] Buri René, Kobel Beat (2004): Wärmenutzung aus Abwasser – Leitfaden für Inhaber, Betreiber und Planer von Abwasserreinigungsanlagen und Kanalisationen. Bern: Bundesamt für Energie BFE. URL: <http://www.bfe.admin.ch/infrastrukturanlagen/> [Stand 3.3.2009].
- [13] SR 814.20 Bundesgesetz vom 24. Januar 1991 über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG). URL: <http://www.admin.ch/> [Stand 1.8.2008].
- [14] SR 814.201 Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 (GSchV). URL: <http://www.admin.ch/> [Stand 1.7.2008].
- [15] Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (2003) AWEL-Standard Wärmenutzung aus Abwasser: Kanalisation (ungereinigt) und ARA-Abläufe (gereinigt). Zürich: AWEL. URL: <http://www.awel.zh.ch/> [Stand 3.3.2009].
- [16] Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (???) AWEL-Standard. Wärmeentzug/-eintrag bei Oberflächengewässern. Zürich: AWEL. URL: <http://www.awel.zh.ch/> (Suchen: Wärmenutzung) [Stand 3.3.2009].
- [17] Gujer Willi (2002): Siedlungswasserwirtschaft. Berlin: Springer.
- [18] Wanner Oskar (2004): Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen. Schlussbericht Projekt Nr. 44177. Bern: Bundesamt für Energie BFE. URL: <http://www.energieforschung.ch/> [Stand 3.3.2009].

- [19] Christensen Björn E., Characklis William G. (1990): Physical and chemical properties of biofilms. In: Biofilms, Characklis William G and Marshall Kevin (Hrsg.). New York: John Wiley.
- [20] Hujsman Jacco L. (2001): Transport and transformation processes in combined sewers. Schriftenreihe des Instituts für Hydromechanik und Wasserwirtschaft, Band 10. Zürich: ETH.
- [21] Nijssen René (2004): Nutzung von Abwasser-Wärme aus der ARA Arbon für den Wärmeverbund Salwiese-Bleiche - Betriebserfahrungen. Schlussbericht DIS-Projekt Nr. 45637. Bern: Bundesamt für Energie BFE.  
URL: <http://www.energieforschung.ch/> [Stand 3.3.2009].
- [22] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (2000): SIA Norm 190 Kanalisationen. SN 533190. Zürich: SIA.
- [23] TAPROGGE GmbH, Wetter, Deutschland. URL: <http://www.taprogge.de/> [Stand 4.3.2009].
- [24] Wyss Wassertechnik AG, Winterthur. URL: <http://www.wyss-wassertechnik.ch/> [Stand 4.3.2009].
- [25] Kracht Oliver, Gujer Willi (2005): Quantification of infiltration into sewers based on time series of pollutant loads. Wat. Sci. Tech. 52/3, S. 209-218.
- [26] Buri René, Kobel Beat (2005): Energie aus Kanalabwasser – Leitfaden für Ingenieure und Planer. Osnabrück: Deutsche Bundesstiftung Umwelt DBU. URL: <http://www.dbu.de/> [Stand 3.3.2009].
- [27] Wanner Oskar, Clavadetscher Peter, Siegrist Hansruedi (2005): Auswirkungen der Abwasserabkühlung auf den Kläranlagenbetrieb, Gas Wasser Abwasser 2, 111-118.
- [28] Maxim Integrated Products, Glattbrugg. URL: <http://www.maxim.com/> [Stand 4.3.2009].
- [29] Endress+Hauser Metso AG, Reinach. URL: <http://www.ch.endress.com/> [Stand 10.3.2009].

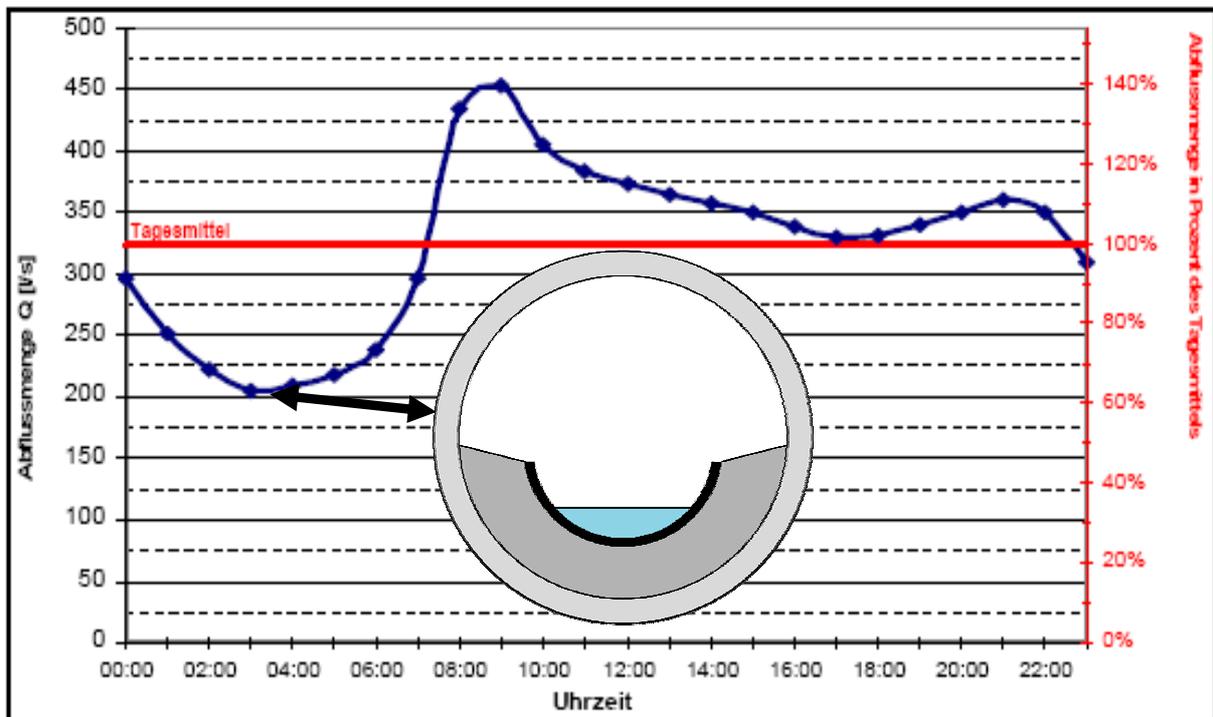
## Anhang

### 10 Zusätzliche Einflussfaktoren der Abwasserenergienutzung

Neben der Wärmetauscherverschmutzung gibt es noch andere Faktoren, die für den Betrieb von Anlagen zur Abwasserenergienutzung von Bedeutung sind und bei der Planung und Realisierung von Projekten zu berücksichtigen sind. In diesem Kapitel werden die wichtigsten Faktoren in Bezug auf die abwasserseitigen Rahmenbedingungen kurz zusammengefasst.

#### 10.1 Grösse und Dynamik des Abwasservolumenstroms

Die Nutzung von Abwasserwärme kommt in der Regel für mittlere Trockenwetterabflüsse ab 15 Litern pro Sekunde, d.h. für Gemeinden ab 5'000 Einwohnern, in Frage. Diese Minimalanforderung ist aber nicht hinreichend für den erfolgreichen Betrieb einer Abwasserenergienutzungsanlage. Es muss auch berücksichtigt werden, dass der Abfluss in der Kanalisation einen charakteristischen Tagesgang und saisonale Schwankungen aufweist. Diese Schwankungen sind abhängig davon, welchen Anteil Haushalte, Industrie- und Gewerbebetriebe am Abwasseranfall haben, und wie gross der Fremdwasseranteil ist [25]. Auch die Ausdehnung des Einzugsgebiets spielt eine Rolle; mit zunehmender Grösse des Einzugsgebiets nehmen die Tagesschwankungen des Abflusses tendenziell ab.



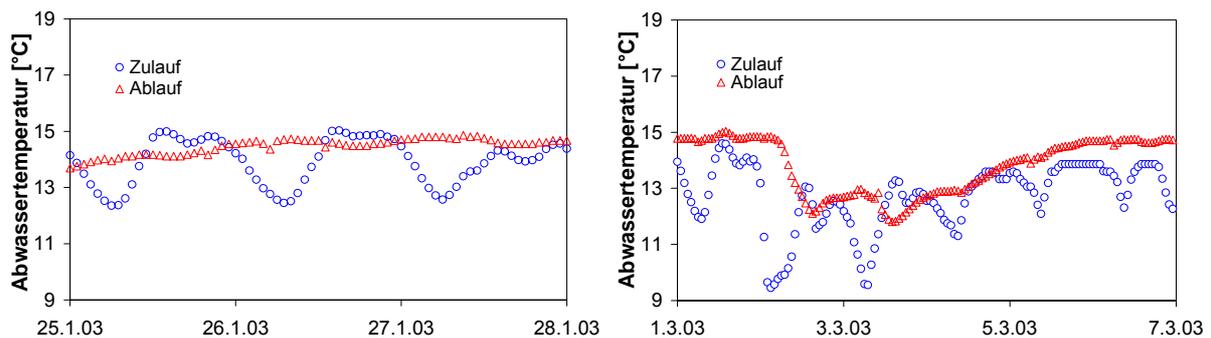
**Abbildung 28:** Tagesgang des Abwasservolumenstroms und ungenügende Benetzung des Rinnenwärmetauschers am Abflussminimum [26].

Da die Wärmetauscherleistung proportional zur benetzten Wärmetauscherfläche ist, muss die vollständige Benetzung des Wärmetauschers gewährleistet sein. Beim Beispiel in Abbildung 28 ist dies für das Minimum des Abflusstagesgangs nicht der Fall. Da dieses Minimum typischerweise in den frühen Morgenstunden auftritt, und zu dieser Tageszeit im Normalfall eine grosse Heizleistung nachgefragt wird, kann mit dieser Abwasserenergienutzungsanlage keine optimale Leistung erzielt werden.

Bei Anlagen, die mit gereinigtem Abwasser beschickt werden, existiert diese Problematik kaum, da die Kläranlage die Schwankungen des Abwasservolumenstroms dämpft. Sind die Abflussschwankungen dennoch zu gross, kann das Abwasser in einem Vorlagebehälter gespeichert und aus diesem in den Wärmetauscher gepumpt werden.

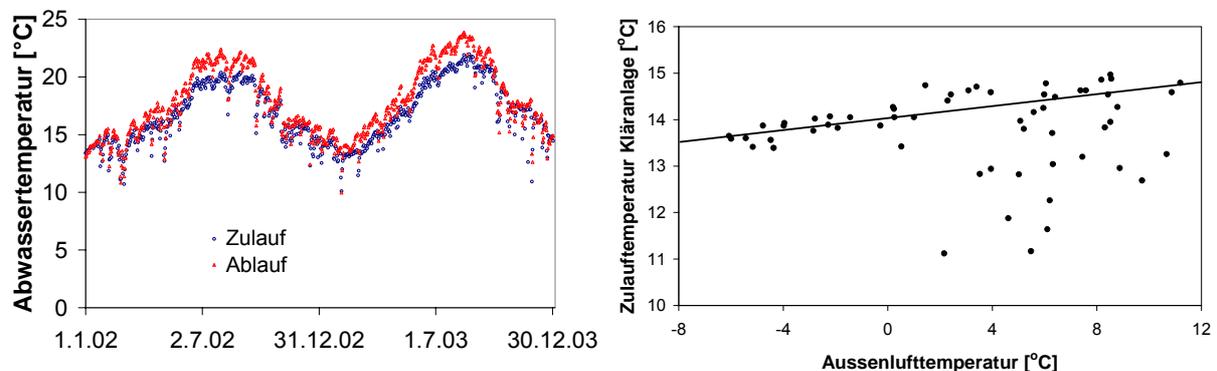
## 10.2 Grösse und Dynamik der Abwassertemperatur

Hohe Abwassertemperaturen haben einen positiven Einfluss auf die Wärmetauscherleistung (Abbildung 20). Die Abwassertemperatur hat normalerweise das Maximum am Ort ihres Anfalls, nimmt auf dem Fließweg zur Kläranlage ab und weist ebenfalls einen mehr oder weniger ausgeprägten Tagesgang auf, der bei Trockenwetter relativ regelmässig ist [1]. Abbildung 29 (links) zeigt gemessene Zulauftemperaturen der Kläranlage Werdhölzli in Zürich mit typischen Tagesschwankungen in der Grössenordnung von 2 °C bis 3 °C. Wegen der Durchmischung und Aufenthaltszeit des Abwassers von rund 8 bis 24 Stunden in einer Kläranlage werden diese Schwankungen stark gedämpft. Wie aus dem Bild zu ersehen ist, liegen die Tagesschwankungen der Ablauftemperatur nur noch in einer Grössenordnung von 0.5 °C. Aufgrund interner Prozesse ist die Ablauftemperatur um 0.5 °C bis 1 °C höher als die mittlere Zulauftemperatur [27].



**Abbildung 29:** Typische Tagesgänge der Abwassertemperatur im Zulauf und Ablauf der Kläranlage Zürich-Werdhölzli bei Trockenwetter (links) und nach einem Regenereignis am 1. März 2003 (rechts).

Rechts in Abbildung 29 ist ein massiver Einbruch der Zulauftemperatur in der Folge eines Regenereignisses dargestellt. Auch bei Regenwetter ist eine Dämpfung der Temperaturschwankungen zu beobachten - die mittleren Ablauftemperaturen liegen um mehrere Grad Celsius über den Tiefstwerten der Zulauftemperatur – doch kann hier die Ablauftemperatur für mehrere Tage nachhaltig reduziert sein.



**Abbildung 30:** Tagesmittelwerte der Zulauf- und Ablauftemperatur der Kläranlage Werdhölzli in Zürich für die Jahre 2002 und 2003 (links) und der Zulauftemperatur im Januar und Februar 2002 aufgetragen gegen die Aussenlufttemperatur (rechts).

Die Abwassertemperatur variiert auch saisonal zwischen rund 20 °C in den Sommermonaten und 10 °C bis 15 °C in den kalten Wintermonaten (Abbildung 30 links). Auch hier ist deutlich zu sehen, dass die Ablaufwerte im Allgemeinen über den Werten im Zulauf liegen. Interessant ist, dass die Temperaturen im Herbst, in einer Zeit, die bereits in der Heizperiode liegt, erst sehr spät unter 15 °C absinken. An einigen kalten Tagen fällt die Temperatur bis auf 10 °C ab, und es muss berücksichtigt werden, dass sich diese tiefen Temperaturen auf die biologischen Prozesse in der Kläranlage auswirken können.

Abbildung 30 (rechts) zeigt die gemessenen Tagesmittelwerte der Zulauftemperatur der Kläranlage Werdhölzli in Zürich für Januar und Februar 2002, aufgetragen gegen die Aussenlufttemperatur. Für die tiefsten Aussenlufttemperaturen liegt die Zulauftemperatur im Tagesmittel bei ca. 13,5 °C. Die eingezeichnete flache Gerade charakterisiert Trockenwetterwerte. Sie zeigt, dass die Temperatur der Aussenluft die des Abwasser nur wenig beeinflusst. Bei den Punkten in der rechten unteren Hälfte des Bildes handelt es sich um Daten, für die der Zufluss zur Kläranlage erhöht war. Die tiefsten Werte der Zulauftemperatur in diesen Wintermonaten lagen bei ca. 11 °C. Sie sind primär auf Niederschläge oder Schmelzwasser zurückzuführen.

### 10.3 Begrenzungen für die Abwasserenergienutzung vor der Kläranlage

Durch die Wärmenutzung aus der Kanalisation darf die Abwassertemperatur nicht unbeschränkt abgesenkt werden, denn die Reinigungsleistung einer nachfolgenden Kläranlage ist temperaturabhängig. In der schweizerischen Gewässerschutzverordnung [14] sind Minimalanforderungen an die Reinigungsleistung festgelegt, z.B. die, dass das Tagesmittel der Konzentration für Ammonium im Ablauf auf unter 2 mgNH<sub>4</sub>-N/L reduziert werden muss. Es stellt sich also die Frage, um wie viel Grad das Abwasser ohne Beeinträchtigung des Kläranlagenbetriebs abgekühlt werden darf [27].

Für eine korrekt dimensionierte und betriebene Kläranlage ergeben sich normalerweise keine Probleme betreffend Reinigungsleistung, wenn die Dimensionierungstemperatur durch die Wärmeentnahme nicht unterschritten wird und wenn die folgenden Kriterien beachtet werden:

- Falls die durch eine Wärmeentnahme aus einem Kanalisations-Teilstrang resultierende Temperatur im Kläranlagenzulauf im Durchschnitt der Wintermonate Dezember, Januar und Februar 10 °C nicht unterschreitet und die resultierende Abkühlung im Kläranlagenzulauf  $\leq 0,5$  K ist (entspricht dem langjährigen periodenbezogenen Schwankungsbereich), ist die Wärmeentnahme ohne detaillierte Untersuchungen zulässig.
- Falls die im vorhergehenden Punkt aufgeführten Bedingungen nicht erfüllt sind, muss eine detaillierte Überprüfung des Einflusses auf den Kläranlagenbetrieb unter Berücksichtigung der Dimensionierungstemperatur erfolgen. Anhand der Überprüfung kann entschieden werden, ob die Reinigungsleistung der Kläranlage durch die geplante Wärmeentnahme nicht beeinträchtigt wird und ob die Wärmeentnahme zulässig ist. Dabei müssen die Einleitbedingungen in die Gewässer, insbesondere für Ammonium und Nitrit erfüllt werden können.
- Bei der Erteilung einer Gewässerschutzrechtlichen Bewilligung sind bestehende und geplante Wärmeentnahmen im gleichen Kanalisationsnetz vor der Kläranlage zu berücksichtigen (Kumulierung der Abkühlungen bis zum Kläranlagenzulauf). Dabei gilt für die Wärmenutzer das Prinzip „first come - first serve“.

Falls tiefe Abwassertemperaturen für den Betrieb der Kläranlage ein Problem darstellen, kann eine in der Kanalisation installierte Wärmenutzungsanlage von der Kläranlage aus zeitweilig abgestellt werden, entweder manuell oder gesteuert über die Zulauftemperatur der Kläranlage. Dies kann meist problemlos geschehen, denn fast überall wird für die Abdeckung von Wärmebedarfsspitzen an den kältesten Wintertagen zusätzlich zur Wärmepumpe ein Gas- oder Ölheizkessel eingesetzt, d.h. die Wärmepumpen-Anlage wird bivalent ausgelegt. 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 der Abwasser-Wärmepumpe mit einem Blockheizkraftwerk möglich, das Strom für den Antrieb der Wärmepumpe liefern kann.

## 10.4 Begrenzungen der Abwasserenergienutzung bei Einleitungen in Gewässer

Basierend auf der schweizerischen Gewässerschutzverordnung [14] können auch für die Wärmenutzung aus gereinigtem Abwasser nach der Kläranlage, bzw. vor dem Fließgewässer, Grenzkriterien formuliert werden:

- Die Temperatur in einem Fluss oder Bach darf sich durch eine Wärmeenergienutzung nicht um mehr als 3 K, resp. 1,5 K in Forellengewässern, ändern und darf 25 °C nicht überschreiten.
- Um lokale Beeinträchtigungen der Flora und Fauna auszuschliessen, soll die Abwassertemperatur nach der Wärmeentnahme an der Einleitstelle 1 °C nicht unterschreiten und schnelle Temperaturänderungen im Gewässer von mehr als 1.5 K sind zu vermeiden [15,16].
- Wird Abwasser entnommen und in ein anderes Gewässer eingeleitet, müssen die Restwasserbestimmungen für den Vorfluter beachtet werden.

## 11 Verwendete Untersuchungsmethoden

Zur Bestimmung der Abnahme des Wärmedurchgangs infolge der Wärmetauscherschmutzung ist gemäss den Gleichungen im Anhang 11.3 die Messung der Zu- und Ablauftemperatur des Abwassers, der Vor- und Rücklauftemperatur des Zwischen- oder Kühlkreislaufs, sowie des Durchflusses des Abwassers oder des Zwischenkreislaufs notwendig.

Da nur auf einer der untersuchten Anlagen diese Daten komplett gemessen und aufgezeichnet werden, mussten sie bei den anderen Anlagen durch eigene Messungen ergänzt werden. Um die Kosten und den organisatorischen Aufwand möglichst gering zu halten, wurden einfach ein- und auszubauende Messsonden mit jeweils eigenem Datenspeicher eingesetzt.

### 11.1 Messung der Temperatur

Die für die Temperaturmessungen verwendeten Knopf-Sonden [28] sind in Abbildung 31 (links) abgebildet. Sie zeichnen sich durch Kompaktheit und einfache Anwendung aus. Dadurch war es möglich, diese Sonden gut isoliert direkt auf den Leitungen anzubringen. Der eingebaute Speicher erlaubt es, Temperaturdaten mit einer Auflösung von 0.0625 K für rund vier Wochen im Abstand von zehn Minuten aufzuzeichnen. Die Übertragung der Daten von der Sonde auf den Computer erfolgt mittels eines Auslesegeräts. Das einzige Problem bei der Verwendung dieser Sonden betraf das Auslesegerät, das nur über eine serielle Schnittstelle an den Computer angeschlossen werden konnte. Da serielle Schnittstellen heute nicht mehr gebräuchlich sind, musste ein Konverter für USB-Schnittstellen gekauft werden, der allerdings nicht immer zufriedenstellend funktioniert hat. Es wird deshalb empfohlen, bei der Anschaffung solcher Sonden abzuklären, ob ein Auslesegerät mit USB-Anschluss erhältlich ist und ob die mitgelieferte Software mit dem vorhandenen Betriebssystem des Computers zusammenarbeitet.



**Abbildung 31:** Temperatursonden (links) und Durchflussmessgerät (rechts).

## 11.2 Messung des Durchflusses

Die auf zwei Anlagen eingesetzte Durchflussmessung von Endress+Hauser basiert auf dem Ultraschallprinzip [29]. Für die Messung werden zwei Sonden, ein Sender und ein Empfänger, am Rohr angebracht (Abbildung 31, rechts). Vor der Messung müssen die wichtigen Rohrparameter eingegeben werden, wie beispielsweise die Wanddicke und der Durchmesser. Weil einige Parameter, wie die Art und Dicke der Ablagerungen im Innern des Rohrs nicht messbar sind, empfiehlt sich die Kalibrierung der Durchflussmessung z.B. durch eine Wasseruhr, um richtige Absolutwerte des Durchflusses zu erhalten. Ohne Kalibrierung liefert die Messung nur Relativwerte des Durchflusses, was aber je nach Zielsetzung ausreichend sein kann. Zur Datenaufzeichnung wurde ein herkömmlicher Datenlogger verwendet [29].

## 11.3 Berechnung Wärmetauscherleistung und Wärmedurchgangskoeffizient

Die dem Abwasser entnommene Wärmeleistung  $W_A$  ist proportional zum Volumenstrom  $Q_A$  und zur Differenz der Zulauf- und Abflautemperatur,  $T_{Ain} - T_{Aout}$ , des Abwassers im Wärmetauscher und kann aus diesen Größen berechnet werden als

$$W_A = c_W \rho_W Q_A (T_{Ain} - T_{Aout}) \quad \text{Gleichung 1}$$

Die Bedeutung aller übrigen in den Gleichungen verwendeten Symbole wird in der Nomenklaturliste im Anhang 12.2 erklärt. Die Leistung des Wärmetauschers  $W_{WT}$  ist gleich

$$W_{WT} = k A_{WT} \Delta T_{WT} \quad \text{Gleichung 2}$$

mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$ , dessen Reziprokwert als Widerstand für den Wärmeaustausch im Wärmetauscher interpretiert werden kann und der gegeben ist durch

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_A} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_Z} + \frac{1}{f} \quad \text{Gleichung 3}$$

wo die Terme auf der rechten Seite für den Widerstand der abwasserseitigen Grenzschicht, der Wärmetauscherwand, der wärmepumpenseitigen Grenzschicht und der Schmutzschicht auf der Wärmetauscheroberfläche stehen [18]. Der letzte Term wird durch den sog. fouling factor  $f$  ausgedrückt. Die logarithmische Temperaturdifferenz  $\Delta T_{WT}$  ist für den im Gegenstromprinzip betriebenen Wärmetauscher gleich

$$\Delta T_{WT} = \frac{(T_{Ain} - T_{ZV}) - (T_{Aout} - T_{ZR})}{\ln \frac{(T_{Ain} - T_{ZV})}{(T_{Aout} - T_{ZR})}} \quad \text{Gleichung 4}$$

und für den im Gleichstrom betriebenen Wärmetauscher gleich

$$\Delta T_{WT} = \frac{(T_{Ain} - T_{ZR}) - (T_{Aout} - T_{ZV})}{\ln \frac{(T_{Ain} - T_{ZR})}{(T_{Aout} - T_{ZV})}} \quad \text{Gleichung 5}$$

wo  $T_{ZV}$  und  $T_{ZR}$  die Vorlauf- resp. Rücklauftemperaturen im Zwischenkreislauf sind. Die Leistung im Zwischenkreislauf kann analog zu Gleichung 1 berechnet werden als

$$W_Z = c_Z \rho_Z Q_Z (T_{ZV} - T_{ZR}) \quad \text{Gleichung 6}$$

Im stationären Zustand und unter Vernachlässigung allfälliger Verluste gilt

$$W_{WT} = W_A = W_Z \quad \text{Gleichung 7}$$

Wenn eine dieser Leistungen und die in die Gleichungen 4 oder 5 eingehenden Temperaturen bekannt sind, kann aus Gleichung 2 der Wärmedurchgangskoeffizient für den Wärmetauscher berechnet werden als

$$k = \frac{W_{WT}}{A_{WT} \Delta T_{WT}} \quad \text{Gleichung 8}$$

Für den sauberen Wärmetauscher mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten  $k_0$  ist  $1/f=0$ . Subtraktion der Gleichung 3 mit  $1/k$  für den verschmutzten Wärmetauscher von der Gleichung 3 mit  $1/k_0$  für den sauberen Wärmetauscher ergibt unter der Annahme unveränderter  $\alpha_A$  und  $\alpha_K$  für den fouling factor  $f$ , als Gradmesser der Wärmetauscherverschmutzung:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{k} - \frac{1}{k_0} \quad \text{Gleichung 9}$$

## 12 Nomenklatur

### 12.1 Verwendete Abkürzungen

PT	Plattenwärmetauscher
RB	Rohrbündelwärmetauscher
RT	Rinnenwärmetauscher

### 12.2 Verwendete Symbole

Für die Temperatur wird die Einheit Grad Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), für Temperaturdifferenzen die Einheit Kelvin (K) verwendet.

$A_{WT}$	Fläche des Wärmetauschers [ $\text{m}^2$ ]
$c_W$	spezifische Wärmekapazität Wasser, $c_W \approx 4200$ [ $\text{Ws/kg/K}$ ]
$c_Z$	spezifische Wärmekapazität Medium Zwischenkreislauf [ $\text{Ws/kg/K}$ ]
$d$	Dicke Wärmetauscherblech [m]
$f$	fouling factor [ $\text{W/m}^2/\text{K}$ ]
$k$	Wärmedurchgangskoeffizient des verschmutzten Wärmetauschers [ $\text{W/m}^2/\text{K}$ ]
$k_0$	Wärmedurchgangskoeffizient des sauberen Wärmetauschers [ $\text{W/m}^2/\text{K}$ ]

$Q_A$	Volumenstrom Abwasser [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$Q_H$	Volumenstrom Heizkreislauf [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$Q_K$	Volumenstrom Kältemittelkreislauf [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$Q_Z$	Volumenstrom Zwischenkreislauf [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$T_{Ain}$	Temperatur Abwasser Zulauf Wärmetauscher [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{Aout}$	Temperatur Abwasser Ablauf Wärmetauscher [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{HR}$	Temperatur Heizkreislauf Rücklauf [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{HV}$	Temperatur Heizkreislauf Vorlauf [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{KR}$	Temperatur Kältemittelkreislauf Rücklauf [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{KV}$	Temperatur Kältemittelkreislauf Vorlauf [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{ZR}$	Temperatur Zwischenkreislauf Rücklauf [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{ZV}$	Temperatur Zwischenkreislauf Vorlauf [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$W_A$	Leistung Abwasser [W]
$W_H$	Leistung Heizkreislauf [W]
$W_K$	Leistung Kältemittelkreislauf [W]
$W_{WT}$	Leistung des Wärmetauschers [W]
$W_Z$	Leistung Zwischenkreislauf [W]
$\alpha_A$	Wärmeübergangskoeffizient Abwasserseite [ $\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ ]
$\alpha_Z$	Wärmeübergangskoeffizient Wärmepumpenseite [ $\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ ]
$\Delta T_{WT}$	logarithmische Temperaturdifferenz [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit Wärmetauscherblech [ $\text{W}/\text{m}/\text{K}$ ]
$\rho_W$	Dichte Wasser, $\rho_W \approx 1000$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\rho_Z$	Dichte Medium Zwischenkreislauf [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]



Eawag  
Überlandstrasse 133  
Postfach 611  
8600 Dübendorf  
Schweiz  
Telefon +41 (0)44 823 55 11  
Telefax +41 (0)44 823 50 28  
[www.eawag.ch](http://www.eawag.ch)