

Zwischenbericht, 17. April 2003

# Projekt Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen

|                                  |                                                                                       |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Autor und Koautoren              | Oskar Wanner, Vassileios Panagiotidis, Jakob Eugster, Hansruedi Siegrist              |
| beauftragte Institution          | Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG)      |
| Adresse                          | Überlandstrasse 133, 8600 Dübendorf                                                   |
| Telefon, E-mail, Internetadresse | 01 823 5090, wanner@eawag.ch, <a href="http://www.eawag.ch/">http://www.eawag.ch/</a> |
| BFE Projekt-/Vertrag-Nummer      | 44177 / 84216                                                                         |
| Dauer des Projekts (von – bis)   | 1. März 2002 – 29. Feb. 2004                                                          |

## ZUSAMMENFASSUNG

In der Berichtsperiode von Januar bis April 2003 wurde der im Vorjahr entwickelte und aufgebaute Prüfstand, mit dem der Einfluss der Verschmutzung (Biofilmbildung) auf die Leistung des Wärmeübertragers experimentell untersucht werden soll, in Betrieb genommen. Zuerst wurden die Messeinrichtungen kalibriert und mathematische Beziehungen zwischen wichtigen Versuchsparametern bestimmt. Dann wurde die Rinne mit dem eingelegten Wärmeübertrager mit Abwasser beschickt, und es wurden verschiedene Aufwuchsexperimente mit Biofilmen durchgeführt. Die Abnahme der Leistung des Wärmeübertragers in Abhängigkeit von der Biofilmbildung wurde quantifiziert. Dann wurde der Einfluss der Hydraulik auf die Biofilmbildung untersucht. Dabei zeigte es sich, dass durch eine gezielte Veränderung des Abflussregimes grosse Teile des Biofilms abgeschwemmt werden konnten. So konnte die Leistung des verschmutzten Wärmeübertragers, bezogen auf die Leistung des sauberen Wärmeübertragers, von noch 61% vor der Abschwemmung des Biofilms, wieder auf 87% nach der Abschwemmung erhöht werden. Die Abschwemmung des Biofilms konnte mehrere Male hintereinander wiederholt werden.

## Projektziele

Die Ziele des Projekts „Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen“ sind im Jahresbericht 2002 aufgeführt ([http://www.waermepumpe.ch/fe/Wa\\_WQA\\_JaBe02.pdf](http://www.waermepumpe.ch/fe/Wa_WQA_JaBe02.pdf)). Die Ziele für die Berichtsperiode dieses Zwischenberichts, welche die Zeit von Januar bis April 2003 umfasst, sind

- die Inbetriebnahme des Prüfstands
- die Quantifizierung des Zusammenhangs zwischen Verschmutzung (Biofilmbildung) und Leistung des Wärmeübertragers
- die Untersuchung des Einflusses der Hydraulik auf die Biofilmbildung

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

### INBETRIEBNAHME DES PRÜFSTANDS

Abbildung 1 zeigt den Prüfstand, mit dem der Einfluss der Biofilmbildung auf die Leistung des Wärmeübertragers untersucht wird. In den Boden der Plexiglasrinne (im Hintergrund) ist ein von der Firma KASAG, 3550 Langnau, zur Verfügung gestellter Wärmeübertrager (1,0 x 0,1 m) eingelassen. Die Rinne (hier noch ohne Isolation) wird von links her mit vorgeklärtem kommunalem Abwasser beschickt, das rechts über den schwarzen Zylinder wieder in die Kanalisation zurückfließt. Der Volumenstrom des Abwassers und das Gefälle der Rinne können verstellt werden. In



Abbildung 1: Prüfstand für die Untersuchung des Einflusses der Biofilmbildung auf die Leistung des Wärmeübertragers.

einem geschlossenen Kreislauf fließt Ionentauscherwasser von rechts nach links durch den Wärmeübertrager, von dort durch ein Kühlaggregat (rechts im Bild), und dann wieder zum Wärmeübertrager zurück. Mit dem Kühlaggregat wird ein Verbraucher simuliert und die Eingangstemperatur des Wärmeübertragers gesteuert. Der Volumenstrom im Kühlkreislauf kann variiert werden und wird mit einem Rotameter gemessen. Die Abwassertemperatur im Zufluss der Rinne und die Temperaturen im Zufluss und im Abfluss des Wärmeübertragers werden gemessen (PT 100) und online registriert. Daneben werden auch die Umgebungstemperatur und die Temperatur im Bad des Kühlaggregats gemessen.

Für die Inbetriebnahme des Prüfstands wurde eine Reihe von Vorversuchen durchgeführt zur Kalibrierung der Messeinrichtung und zur Bestimmung mathematischer Beziehungen zwischen wichtigen Versuchsparametern. Der Einfachheit halber wird bei der Beschreibung der Vorversuche stets der Begriff „Abwasser“ verwendet, obwohl alle diese Versuche mit deionisiertem Wasser durchgeführt wurden.

Zuerst wurden die Temperaturfühler, das Rotameter und die Abwasserpumpe, deren Förderleistung über das Leitsystem der Kläranlage eingestellt werden kann, kalibriert. Die Strömungsgeschwindigkeit im Wärmeübertrager in Funktion des Volumenstroms im Kühlkreislauf wurde mit Temperatursprungversuchen näherungsweise bestimmt. Die Strömungsgeschwindigkeit in der Rinne wurde mit Tracerversuchen für verschiedene Abwasservolumenströme und Gefälle gemessen. Auf diese Messwerte wurde eine mathematische Funktion mit den Parametern „Volumenstrom des Abwassers“ und „Rinnengefälle“ gefittet. Abbildung 2 zeigt die Messwerte und die Kurven der Fitfunktion. Diese Fitfunktion wird hier bewusst nicht angegeben, da sie nicht auf andere Anlagen übertragbar ist, weil es sich um eine empirisch gefundene mathematische Funktion handelt.

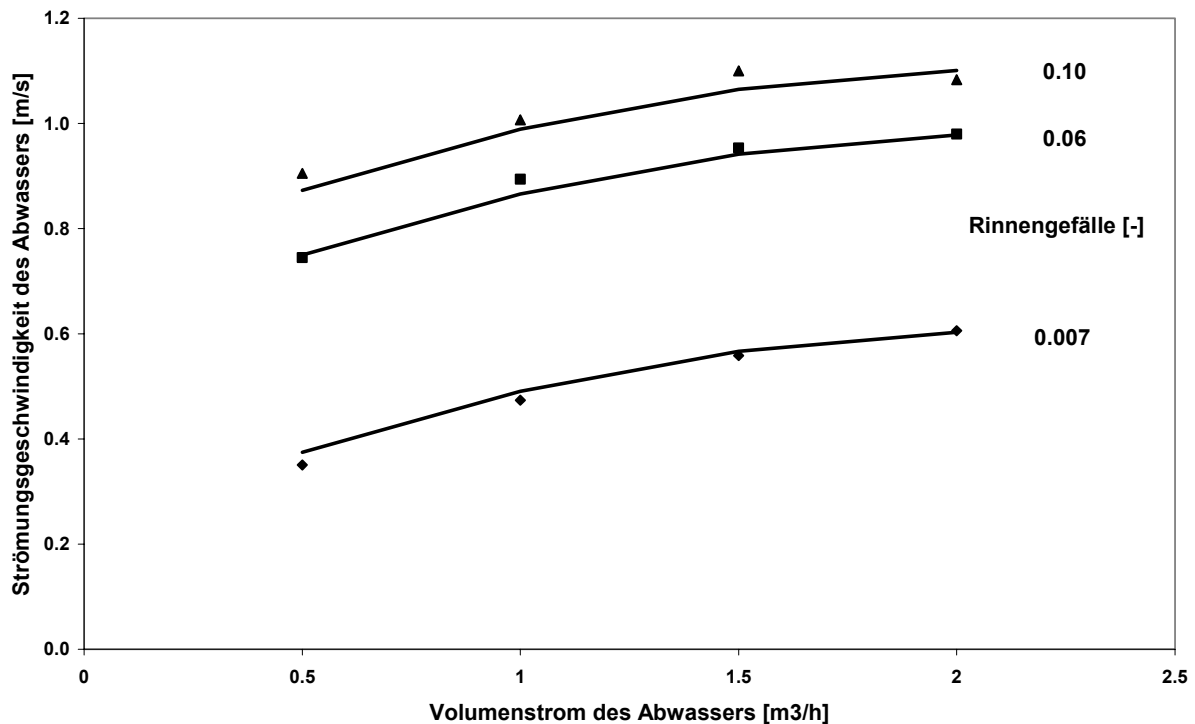


Abbildung 2: Messwerte der Strömungsgeschwindigkeit des Abwassers und empirisch gefundene mathematische Fitfunktion, welche die Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abwasservolumenstrom und Gefälle der Rinne beschreibt.

Mit der gleichen Vorgehensweise wurden empirische mathematische Funktionen für die „Verlustleistung“ und die Wärmeübergangskoeffizienten bestimmt: Mit „Verlustleistung“ wird die Leistung des auf allen Seiten mit Styroporplatten isolierten Prüfstands bezeichnet. Für ihre Bestimmung wurde also der Abwasserstrom abgestellt, der Wärmeübertrager ebenfalls mit einer Styroporplatte abgedeckt, und dann die Erwärmung des Kühlwassers im Wärmeübertrager gemessen. Die „Verlustleistung“ gibt demnach an, wieviel Wärme durch die Isolation hindurch einfließt. Sie konnte durch eine mathematische Funktion mit den Parametern „Umgebungstemperatur“ und „Mittlere Temperatur im Wärmeübertrager“ beschrieben werden. Zur Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizienten auf der Abwasser- und der Kühlwasserseite des Wärmeübertragers wurde eine Reihe von 30 Experimenten durchgeführt, bei denen die Strömungsgeschwindigkeiten variiert wurden. Für alle Experimente wurden die Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$  berechnet aus

$$k = \frac{\dot{Q}_{Ue}}{A_W \Delta T_{AW}} \quad 1$$

wo  $\dot{Q}_{Ue}$  die Leistung und  $A_W$  die Fläche des Wärmeübertragers, und  $\Delta T_{AW}$  die mittlere Temperaturdifferenz von Abwasser und Kühlwasser ist [1]. Die Wärmeübertragerleistung wird berechnet als

$$\dot{Q}_{Ue} = \dot{Q}_W - \dot{Q}_V \quad 2$$

wo  $\dot{Q}_V$  die „Verlustleistung“ und  $\dot{Q}_W$  die vom Kühlwasser im Wärmeübertrager pro Zeiteinheit aufgenommene Wärmemenge ist, die berechnet wird als

$$\dot{Q}_W = c_W \rho_W \dot{V}_W (T_{W,aus} - T_{W,ein}) \quad 3$$

wo  $c_W$  die spezifische Wärmekapazität,  $\rho_W$  die Dichte und  $\dot{V}_W$  der Volumenstrom des Wassers im Kühlkreislauf ist, und  $T_{W,aus}$  und  $T_{W,ein}$  die Temperaturen im Ab- resp. Zufluss des Wärmeübertragers sind. Für die Wärmeübergangskoeffizienten auf der Abwasser- und der Kühlkreislaufseite,  $\alpha_A$  resp.  $\alpha_W$ , wurden die Ansätze gemacht

$$\alpha_A = c_1 + c_2 \cdot V_A^{c_3} \quad 4$$

$$\alpha_W = c_4 + c_5 \cdot V_W^{c_6} \quad 5$$

wo  $V_A$  und  $V_W$  die Strömungsgeschwindigkeiten des Abwassers resp. des Wassers im Kühlkreislauf, und  $c_1$  bis  $c_6$  unbekannte Koeffizienten sind. Diese Koeffizienten wurden wie folgt bestimmt: Für jeden der 30 vorhandenen Datensätze, bestehend aus je einem Zahlenwert für  $k$ ,  $V_A$  und  $V_W$ , wurde unter Verwendung der Gleichungen 4 und 5 eine Gleichung

$$1/k = 1/\alpha_A + d/\lambda + 1/\alpha_W \quad 6$$

aufgestellt, die den Wärmedurchgang durch eine ebene Wand zwischen zwei strömenden Medien beschreibt, und wo  $d$  und  $\lambda$  die Dicke resp. die Wärmeleitfähigkeit des Übertragerblechs sind [1]. Auf diese Weise resultierten 30 Gleichungen mit den 6 Unbekannten  $c_1$  bis  $c_6$ , die mittels Ausgleichsrechnung bestimmt werden konnten.

## QUANTIFIZIERUNG DES ZUSAMMENHANGS ZWISCHEN VERSCHMUTZUNG (BIOFILMBILDUNG) UND LEISTUNG DES WÄRMEÜBERTRAGERS

Nach Abschluss der Vorversuche wurde damit begonnen die Rinne mit vorgeklärtem Abwasser zu beschicken. Innert weniger Tage bildete sich auf dem Wärmeübertrager ein von bloßem Auge erkennbarer Biofilm aus. Der Einfluss des Biofilms auf die Wärmeübertragerleistung wird durch

den sog. Foulingfactor  $f$  quantifiziert, dessen reziproker Wert als Widerstand für den Wärmedurchgang interpretiert werden kann und der berechnet wird als

$$1/f = 1/k - 1/k_o - 1/\alpha_A + 1/\alpha_{Ao} - 1/\alpha_W + 1/\alpha_{Wo} \quad 7$$

wo die Parameter mit Index  $o$  die Werte für den unverschmutzten Wärmeübertrager bezeichnen. Abbildung 3 zeigt wie die Leistung des Wärmeübertragers in Abhängigkeit vom Reziprokwert des Foulingfactors abnahm in einem Experiment, in dem ein Biofilm während 16 Tagen unter konstanten hydraulischen Bedingungen aufwuchs. Der anfänglich grössere Gradient der Leistungsabnahme ist darauf zurückzuführen, dass in dieser Phase des Aufwuchsexperiments die Abwassertemperatur stetig abnahm, wodurch die Wärmeübertragerleistung noch zusätzlich reduziert wurde.

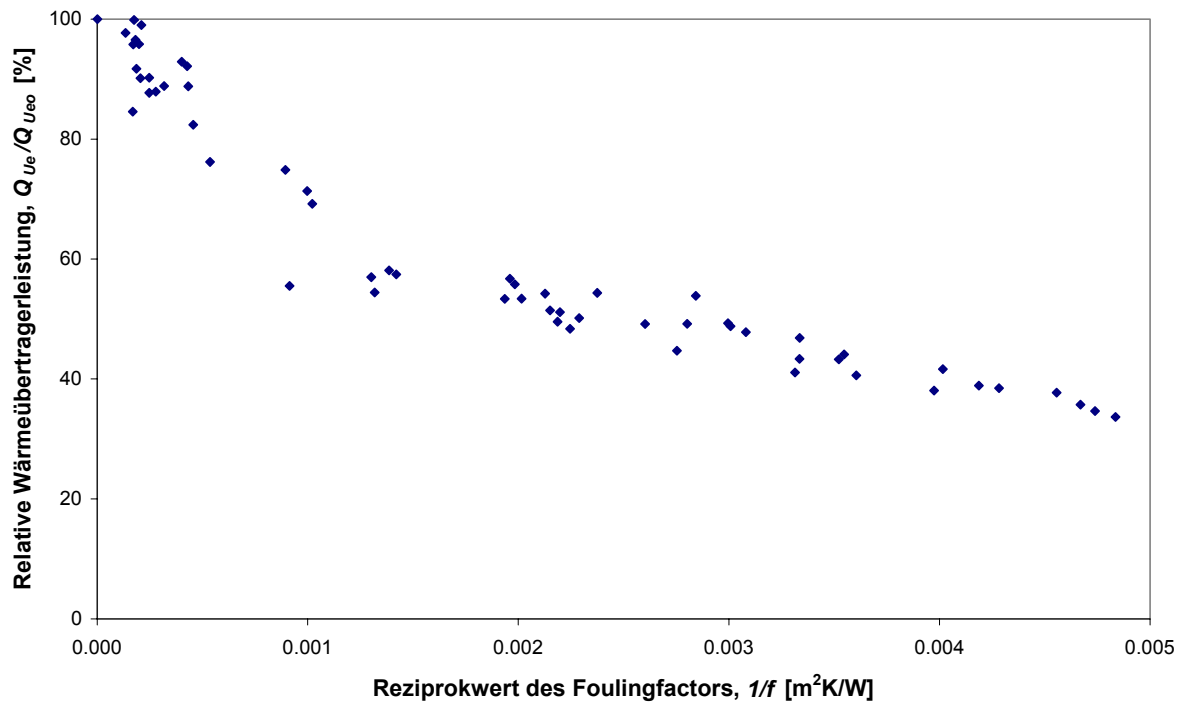


Abbildung 3: Leistung  $Q_{Ue}$  des verschmutzten Wärmeübertragers, bezogen auf die Leistung  $Q_{Ueo}$  des sauberen Wärmeübertragers, in Abhängigkeit vom Reziprokwert des Foulingfactors, der ein Mass ist für die Biofilmbildung auf dem Wärmeübertrager.

Abbildung 4 zeigt eine Nahaufnahme dieses Biofilms, der am Ende des Experiments eine mittlere Dicke von 5 mm hatte. Deutlich zu erkennen ist die unregelmässige Oberflächenstruktur, die davon herrührt, dass bei einem „reifen“ Biofilm, wegen der mechanischen Beanspruchung durch das über den Biofilm hinweg strömende Wasser, stets kleine Stücke aus der Biofilmoberfläche herausgerissen werden, die in der Folge wieder zuwachsen.



Abbildung 4: Nahaufnahme eines Biofilms, der in 16 Tagen auf dem Wärmeübertrager aufgewachsen war. Das Bild zeigt einen Ausschnitt der Biofilmoberfläche von 1,8 x 2,4 cm.

## UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER HYDRAULIK AUF DIE BIOFILMBILDUNG

Gemäss Zielsetzung geht es in diesem Projekt darum Einflussfaktoren der Biofilmbildung zu identifizieren. In einem ersten Experiment wurde der Einfluss der Hydraulik auf die Biofilmbildung untersucht. Abbildung 5 zeigt den zeitlichen Verlauf der Umgebungstemperatur  $T_U$ , Abwassertemperatur  $T_A$ , Zuflusstemperatur  $T_{W, \text{ein}}$  und Abflusstemperatur  $T_{W, \text{aus}}$  des Kühlwassers im Wärmeübertrager und des Reziprokwerts des Foulingfactors,  $1/f$ , während eines 51 Tage dauernden Experiments. Es kann davon ausgegangen werden, dass  $1/f$  in etwa proportional zur Biofilmdicke ist, sodass der Verlauf dieses Parameters die Biofilmentwicklung anzeigt. Während den ersten 16 Tagen des Experiments wuchs der Biofilm unter konstanten hydraulischen Bedingungen auf, mit einem Volumenstrom des Abwassers von  $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$  und einem Rinnengefälle von 0,006, was eine Strömungsgeschwindigkeit des Abwassers in der Rinne von  $0,4 \text{ m/s}$  ergibt. Nach 16 Tagen wurde der Abwasservolumenstrom und das Rinnengefälle schlagartig auf  $2,0 \text{ m}^3/\text{h}$  resp. 0,062 heraufgesetzt, wodurch die Abwassergeschwindigkeit auf  $1,0 \text{ m/s}$  erhöht wurde. Mit diesen hydraulischen Bedingungen wurde die Anlage für 25 Minuten betrieben, dann wurde sie auf die ursprünglichen Bedingungen zurückgefahren. Wie aus Abb. 5 zu ersehen ist, wurde der Biofilm durch die kurzzeitig vergrösserte hydraulische Belastung zu einem grossen Teil abgeschwemmt.

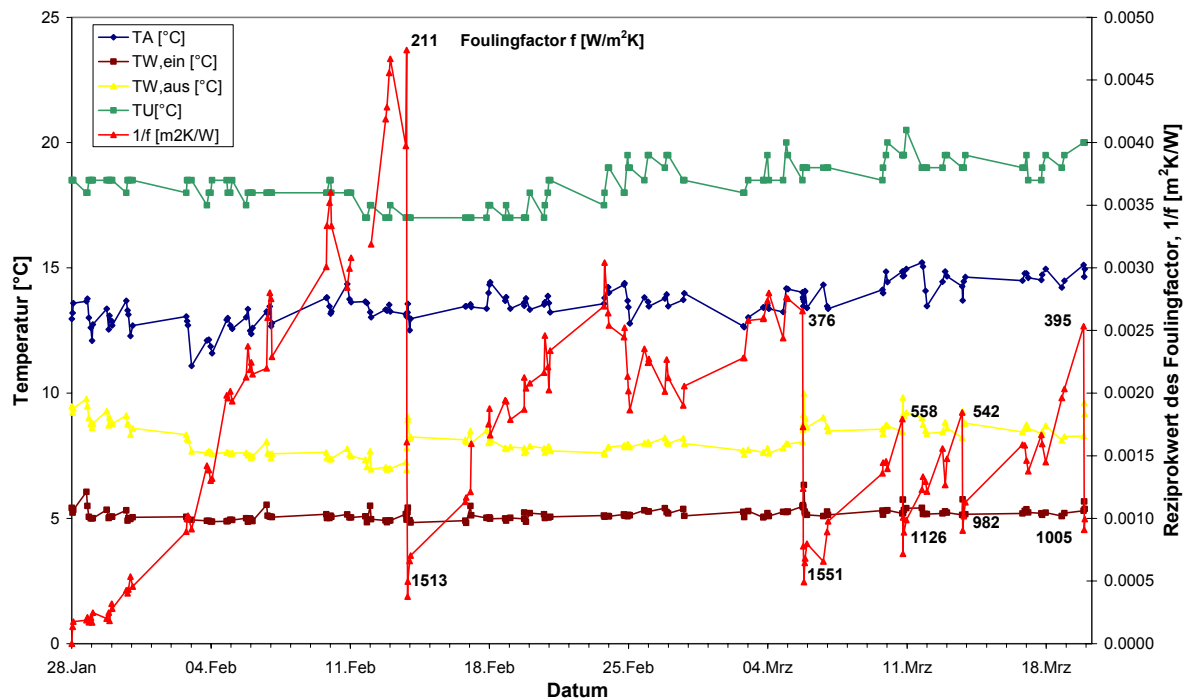


Abbildung 5: Zeitlicher Verlauf der Umgebungstemperatur  $T_U$ , Abwassertemperatur  $T_A$ , Zuflusstemperatur  $T_{W,ein}$  und Abflusstemperatur  $T_{W,aus}$  des Kühlwassers im Wärmeübertrager und des Reziprokwerts des Foulingfactors,  $1/f$ , für wechselnde hydraulische Bedingungen.

Abbildung 6 zeigt den Biofilm nach diesem Vorgang. Ein Teil des Biofilms ist noch vorhanden, aber an einigen Stellen ist die Oberfläche des Wärmeübertragers wieder sichtbar. Nun stellte sich die Frage, ob sich die Abschwemmung des Biofilms wiederholen liess. Um diese Frage zu klären, wurde der Biofilm erneut unter geringer konstanter hydraulischer Belastung aufwachsen gelassen und dann kurzzeitig einer erhöhten Belastung ausgesetzt (Abb. 5). Dies wurde mehrmals wiederholt mit unterschiedlicher Dauer der Aufwuchsphase. Dabei zeigte es sich, dass der Biofilm immer wieder abgeschwemmt werden konnte (Abb. 5). Vor der Abschwemmung vom 20. März betrug die Wärmeübertragerleistung, bezogen auf die Leistung des sauberen Wärmeübertragers, noch 61%; durch die Abschwemmung konnte sie wieder auf 87% erhöht werden. Ob der Reziprokwert des Foulingfactors durch die Abschwemmung auch nach längerer Zeit noch auf die hier beobachteten tiefen Werte reduziert werden könnte, ist im Moment noch offen. Es ist jedoch eine Tatsache, die auch in anderen Experimenten schon beobachtet wurde, dass unter geringer konstanter hydraulischer Belastung gewachsene Biofilme sehr empfindlich sind auf plötzliche Veränderungen dieser Belastung.



Abbildung 6: Nahaufnahme der Biofilmoberfläche nachdem Teile des Biofilms durch erhöhte hydraulische Belastung abgeschwemmt worden waren. Das Bild zeigt einen Ausschnitt der Biofilmoberfläche von 2,4 x 3,2 cm.

## Nationale und internationale Zusammenarbeit

Keine Zusammenarbeit

## Ausblick

Für den Rest des Jahres 2003 sollen weitere Einflussfaktoren der Biofilmbildung untersucht werden, und es sollen Massnahmen zur Verringerung der Biofilmbildung getestet werden. Dabei werden Beschichtungen, Oberflächengüte und Werkstoffe der Wärmeübertrager im Vordergrund stehen.

Die Auswirkungen auf die Kläranlage von Zuflusstemperaturen, die infolge der Wärmeentnahme aus der Kanalisation reduziert sind, sollen noch für den dynamischen Fall untersucht werden mit Daten, die im Winter 2002/03 erhoben wurden.

## Referenzen

- [1] F. W. Winter: **Technische Wärmelehre**, Verlag W. Girardet, Essen, 1964.