

Alexander Vogt, Christoph van Treeck

# **Optimierung von Abwasserwärmetauschern für den gebäudetechnischen Einsatz**

F 3055

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2017

ISBN 978-3-7388-0087-6

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

## **Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben**

### **„Optimierung von Abwasserwärmetauschern für den gebäudetechnischen Einsatz“**

Dipl.-Wirt.-Ing. Alexander Vogt

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph van Treeck

Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen (E3D)

RWTH Aachen University

Das Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-13.36)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Aachen, den 03.01.2017



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>1 Ziel der Forschungsaufgabe .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen .....</b>	<b>3</b>
2.1 Dezentrale Abwasserwärmerückgewinnung .....	3
2.2 Wärmeübertrager .....	4
2.3 Verschmutzungen auf Wärmeübertragern .....	10
<b>3 Aufbau des Versuchsstands .....</b>	<b>21</b>
3.1 Gesamtübersicht über den Versuchsstand .....	21
3.2 Wärmeübertrager .....	26
3.3 Thermostat .....	29
3.4 Abwasserspeicher .....	31
3.5 Verwendetes Abwasser .....	33
3.6 Verwendete Messtechnik .....	33
<b>4 Vermessung des Versuchsstands .....</b>	<b>40</b>
4.1 Konstante Abwassereingangstemperatur .....	40
4.2 Bestimmung des inneren und äußeren Wärmeübergangswiderstands .....	41
4.3 Stationärer Zustand innerhalb des Wärmeübertragers .....	43
4.4 Energiebilanz .....	45
4.5 Versuchsdurchführung .....	46
<b>5 Versuchsbeobachtung und Auswertung der Ergebnisse .....</b>	<b>49</b>
5.1 Wärmeübertrager aus Edelstahl .....	51
5.2 Wärmeübertrager aus Kupfer .....	55
5.3 Wärmeübertrager aus PTFE .....	59
5.4 Zusammenfassung der Wärmeübertragsreduktion .....	63
5.5 Fehlerrechnung .....	67
5.6 Empfehlungen für weitere Messungen .....	69
<b>6 Reinigung des Wärmeübertragers .....</b>	<b>70</b>

---

6.1	Strömungstechnische On-Stream Reinigung .....	71
6.2	Mechanische Off-Stream Reinigung.....	74
6.3	Empfehlungen für die praktische Anwendung bei der Konstruktion von Abwasserwärmeübertragern .....	80
<b>7</b>	<b>Planungsgrundlagen für die Konstruktion von Wärmeübertragern .....</b>	<b>81</b>
7.1	Energetische Optimierung des Wärmeübertragers .....	83
7.2	Ökonomische Optimierung des Wärmeübertragers .....	85
7.3	Planungsempfehlung für den Abwasserwärmeübertrager.....	87
<b>8</b>	<b>Fazit.....</b>	<b>88</b>
8.1	Zusammenfassung der Forschungsarbeiten .....	88
8.2	Weiterer Forschungsbedarf.....	89
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>VII</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>VIII</b>

---

## Abkürzungsverzeichnis

A	Übertragungsfläche
EPS	Extrazelluläre Polymere Substanzen
IBC	Intermediate Bulk Container
k	Wärmedurchgangskoeffizient
MID	Magnetisch-Induktives Durchflussmessgerät
NTU	Number of Transferunits
PE	Polyethylen
Pr	Prandtl-Zahl
PTFE	Polytetrafluorethylen
$\dot{Q}$	Wärmestrom
R	elektrischer Widerstand
Re	Reynoldszahl
$R_f$	Fouling-Widerstand
d	Rohrdurchmesser
s	Wandstärke des Wärmeübertragers
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient
$\Delta T_{lm}$	Temperaturdifferenz
$\xi$	Reibungsbeiwert

## 1 Ziel der Forschungsaufgabe

Als Folge der zunehmenden Verknappung traditioneller, fossiler Energieträger wie Erdöl, Erdgas oder Kohle und dem daraus resultierenden Preisanstieg, wird es in Zukunft von wachsender Bedeutung sein, Energie effizienter zu nutzen. Neben ökonomischen sind es auch ökologische Aspekte, die ein Umdenken im Umgang mit Energie notwendig machen. Dieser Prozess soll durch politisches Handeln, wie den geplanten Atomausstieg bis 2022 und die vereinbarten Ziele des Klima- und Umweltschutzes, beschleunigt werden. Diese Vorgaben der Regierung sollen vor allem durch den Einsatz regenerativer Energien wie Wind und Sonne verwirklicht werden. Steigende Energiepreise und vor allem die Endlichkeit fossiler Energieträger verlangen es, die Suche nach alternativen Energiequellen zu verstärken. Dieser Ansatz wird in Deutschland bereits seit 1980 mit der Förderung des Einsatzes erneuerbarer Energien und dem Ausstieg aus der Kernkraft unter dem Begriff „Energiewende“ verfolgt.<sup>1</sup> So werden Gebäude immer effizienter und können sogar eine positive Energiebilanz erzielen.

Damit allerdings eine nachhaltige Veränderung erzielt werden kann, muss nicht nur die Herkunft der Energie betrachtet werden, sondern auch der Verbrauch von Energie reduziert werden. Eine besonders zielführende Weise den Energieverbrauch zu reduzieren bietet die effizientere Energienutzung. Dies kann zum Beispiel über Energierecycling oder Wärmerückgewinnungsanlagen erreicht werden. Der Energiebedarf privater Haushalte für die Warmwasserproduktion beträgt ca. 15 % des Gesamtenergiebedarfs eines durchschnittlichen Gebäudes.<sup>2</sup> Bei der Betrachtung eines Passiv- oder Nullenergiehauses macht der Warmwasserbedarf dagegen einen signifikanten, wenn nicht maßgeblichen Teil aus. Diese Energie wird meist nur für einen sehr kurzen Prozess genutzt und fließt anschließend größtenteils ungenutzt in die Kanalisation. Wärmerückgewinnungsanlagen ermöglichen es, die Energie in Form von Wärme aus einem solchen, abfließenden Medien zu entziehen und an anderer Stelle wieder zu verwenden.

Die zentrale Problematik bei der Wärmerückgewinnung aus Abwasser ist der durch den sich im Abwasser auf den Wärmeübertragern bildende Biofilm gehemmte Wärmeübertrag. Das Biofilmwachstum wurde bisher nur unzureichend untersucht. Für Abwasser stehen nur unzureichende Daten über die wärmeübertragsmindernde Eigenschaft des Biofilms zur Verfügung. Ohne Kenntnis der zu erwartenden Wärme-

---

<sup>1</sup> Vgl. Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, 2016.

<sup>2</sup> Wert des Umwelt Bundesamts für 2013.

übertragsreduktion sind die korrekte Auslegung und damit auch der effiziente Betrieb einer dezentralen Abwasserwärmerückgewinnungsanlage deutlich erschwert. Weiterhin wird für den flächendeckenden Betrieb einer solchen Anlage ein praxistaugliches Reinigungsverfahren benötigt. Daher widmet sich das Forschungsvorhaben der Untersuchung von Biofilmen in Abwasser sowie der Untersuchung potentieller Reinigungsverfahren.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird ein Versuchsstand konzipiert, der es ermöglicht das Biofilmwachstum auf Wärmeübertragern ausreichend genau zu ermitteln. Es werden verlässliche Angaben über die Biofilmentwicklung auf Wärmeübertragern sowie die Höhe der Wärmeübertragsreduktion im Zeitverlauf reproduzierbar ermittelt. In einem weiteren Teil werden verschiedene Arten der Anströmung auf den Wärmeübertrager durchgeführt und dadurch eine Reduktion des Biofilms erreicht werden. Somit werden für Wärmeübertragertypen aus Kupfer, Edelstahl und PTFE Werte über den Wärmedurchgangswiderstand von Biofilm gemessen. Weiterhin wird die Reduktion des Biofilms durch potentielle Reinigungsmaßnahmen quantifiziert.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Dezentrale Abwasserwärmerückgewinnung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Dezentrale Abwasserwärmerückgewinnung zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden“ wurde der Ansatz der gebäudeinternen Abwasserwärmerückgewinnung im privaten Kanalnetz untersucht.<sup>3</sup> Aufgrund der im Vergleich zu anderen regenerativen Energiequellen hohen Abwassertemperatur im Gebäude von 23 – 25 °C ist eine hohe Effizienz einer eingesetzten Wärmepumpentechnologie zu erwarten. Zusätzlich steht mit dem Gebäude ein direkter Abnehmer der zurückgewonnenen Wärme zur Verfügung.

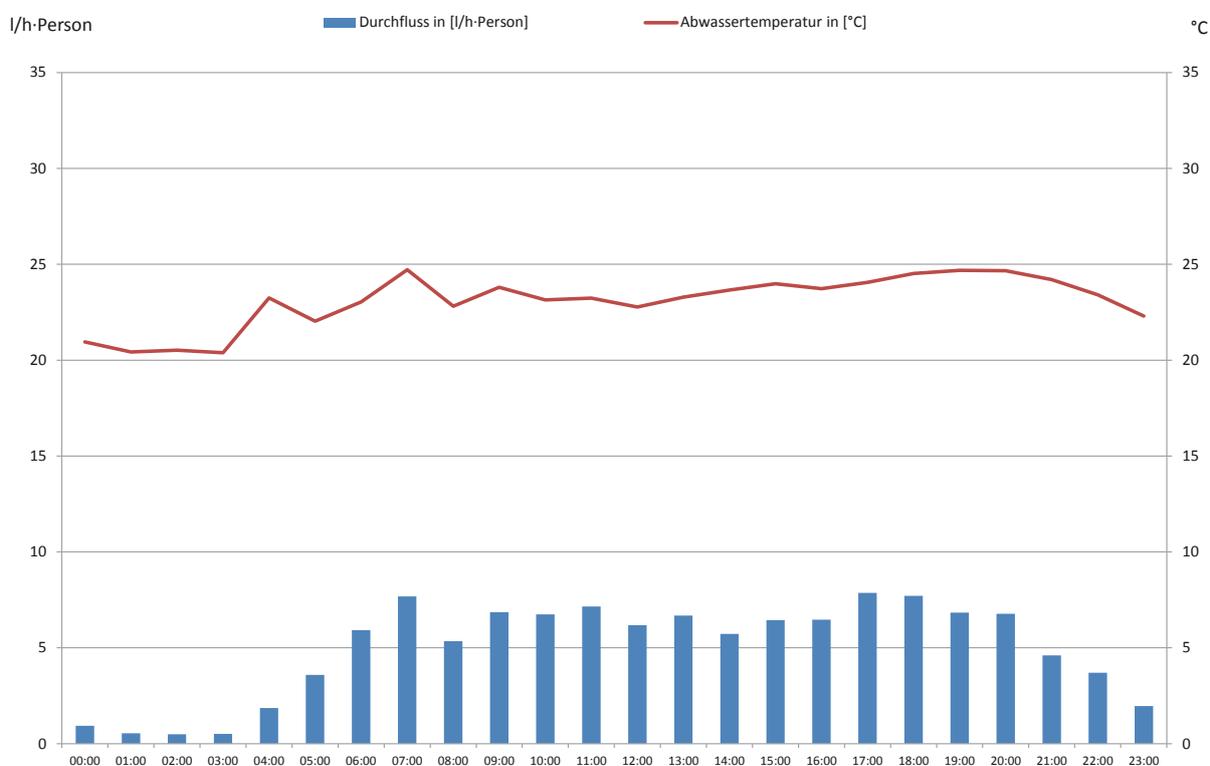


Abbildung 1: Mehrfamilienhaus in Düren, Abwasserganglinie, werktags<sup>4</sup>

Die Forschungsarbeiten knüpfen an das im Frühjahr 2012 abgeschlossene, ebenfalls mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau, Stadt- und Raumforschung geförderten Forschungsvorhaben „Dezentrale Wärmerückge-

<sup>3</sup> Vgl. Brunk, Marten F.; Seybold, Christopher: Dezentrale Abwasserwärmerückgewinnung zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden. Endbericht der RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Baubetrieb und Gebäudetechnik im Forschungsprogramm Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesministeriums für Verkehr, Bau, Stadtentwicklung, Aktenzeichen: SF-10.08.18.7-11.38. Aachen, 2015.

<sup>4</sup> Vgl. Brunk, M.; Seybold, C.; Vogt, A., 2013, S. 52 f.

winnung aus häuslichem Abwasser“ (SF-10.08.18.7-10.4) an.<sup>5</sup> In den abgeschlossenen Forschungsvorhaben wurde eine messtechnische Potentialanalyse an zwei Studentenwohnheimen, einem Hotel, einem Krankenhaus sowie an zwei Wohngebäuden durchgeführt. Ermittelt wurden das Energiepotential anhand von Abwassermengen und Abwassertemperaturmessungen.

**Abbildung 1** zeigt eine repräsentative Tagesganglinie der Abwassertemperatur und der Abwassermenge eines Werktages für ein Mehrfamilienhaus in Düren. Es handelt sich um ein Haus mit 19-20 Bewohnern, das in den 1960er Jahren errichtet, und in den 1990er Jahren saniert wurde. Der Wasserdurchfluss ist über den Tag relativ konstant und das Tagesmaximum tritt zwischen 17:00 und 18:00 Uhr auf. Nach 18:00 Uhr nimmt der Durchfluss stetig ab, bis dieser um 02:00 Uhr das Tagesminimum erreicht hat. Das morgendliche Temperaturmaximum mit 24,7 °C ist um 07:00 Uhr. Ein weiteres Temperaturmaximum zeigt sich zwischen 19:00 Uhr und 20:00 Uhr abends. Das Tagesminimum der Temperatur wird um 02:00 Uhr mit 20,4 °C erreicht.<sup>6</sup>

Weiterhin wurden eine Analyse der jahreszeitlichen Schwankungen des Abwasserenergieprofils, die Bewertung der maßgeblichen Einflussgrößen auf Abwassertemperaturniveau und Abwassermenge sowie eine detaillierte Analyse mittels dynamischer Simulationsberechnung durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Abwasserenergie theoretisch hausintern mittels Wärmepumpen mit einer hohen Effizienz zurückgewinnen lässt.

## 2.2 Wärmeübertrager

Wärmeübertrager haben das Ziel, ein Fluid entweder zu erwärmen oder abzukühlen. Dies geschieht, indem Energie in Form von Wärme von einem Medium auf ein anderes übertragen wird, ohne dass die beiden Medien in direktem Kontakt stehen. Im vorhandenen Versuchsstand sind beide Medien in Form von Wasser gegeben. Der Wärmeübertrag verläuft, entsprechend dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, immer vom wärmeren zum kälteren Medium. Dadurch, dass die Medien nicht in direktem Kontakt stehen, spricht man von einem indirekten Wärmeübertrager. Während das warme Fluid, hier das Abwasser, an der Trennwand entlang fließt, gibt es über Konvektion  $\alpha_A$  Wärme an die Trennwand ab. Der Transport der Wärme durch die Trennwand erfolgt über die Wärmeleitung  $\lambda$ . Auf der anderen Seite der Trenn-

---

<sup>5</sup> Vgl. Beyert, Joachim; Brunk, Marten F.; Osebold, Rainard; Seybold, Christopher; Vosen, Georg: Dezentrale Wärmerückgewinnung aus häuslichem Abwasser. Endbericht der RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Baubetrieb und Gebäudetechnik im Forschungsprogramm Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesministeriums für Verkehr, Bau, Stadtentwicklung, Aktenzeichen: SF-10.08.18.7-10.4/ II 3 F20-09-1-250. Aachen, 2012.

<sup>6</sup> Vgl. Brunk, M.; Seybold, C.; Vogt, A., 2013, S. 52 f.

wand wird die Wärme dann wieder über Konvektion  $\alpha_B$  von dem kälteren Fluid B, dem Frischwasser, aufgenommen. Der zu überwindende Widerstand für die Wärme setzt sich somit aus drei Komponenten zusammen.

1. Konvektion  $\alpha_A$
2. Wärmeleitung  $\lambda$
3. Konvektion  $\alpha_B$ <sup>7</sup>

Diese drei Komponenten zusammen ergeben den Gesamtwiderstand für die Wärme, der durch den Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$  wiedergegeben wird. Dieser wird auf die Übertragungsfläche  $A$  bezogen. Der  $k$ -Wert kann dementsprechend als eine Reihenschaltung von thermischen Widerständen betrachtet werden. Er wird über folgende Gleichung berechnet:

$$k = \frac{1}{\frac{A}{A_i * \alpha_i} + \frac{A * s}{A_w * \lambda} + \frac{A}{A_a * \alpha_a}} \quad (1)$$

Mit:

- $k$ : Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m<sup>2</sup>\*K)]  
 $A$ : Übertragungsfläche [m<sup>2</sup>]  
 $\lambda$ : Wärmeleitfähigkeit [W/(m\*K)]  
 $\alpha$ : Wärmeübergangskoeffizient [W/(m<sup>2</sup>\*K)]  
 $s$ : Wandstärke des Wärmeübertragers [m]

---

<sup>7</sup> Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verfahrenstechnische Transportprozesse (Hrsg.) S. 1

Die übertragene Wärmemenge zwischen den beiden Medien ermittelt sich aus dem Produkt der Übertragungsfläche  $A$ , des Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$  und der mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz zwischen Ab- und Frischwasser  $\Delta T_{lm}$ .<sup>8</sup>

$$\dot{Q} = k * A * \Delta T_{lm} \quad (2)$$

Mit:

$\dot{Q}$ : Wärmemenge [W]

$k$ : Wärmeübergangskoeffizient [W/(m<sup>2</sup>\*K)]

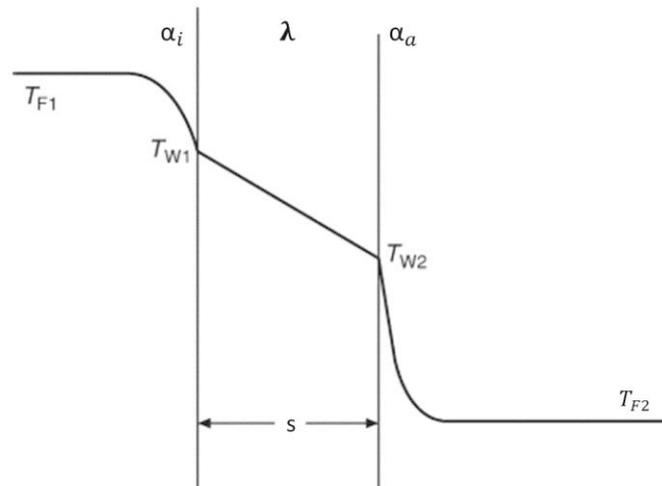
$\Delta T_{lm}$ : Temperaturdifferenz [K]

### 2.2.1 Innerer und äußerer Wärmeübergangswiderstand

Die inneren und äußeren Wärmeübergangswiderstände hängen im Wesentlichen von der Ausprägung der Strömung des den Wärmeübertrager um- bzw. durchströmenden Fluids ab. Zu unterscheiden ist zwischen einer laminaren und einer turbulenten Strömung. Bei der laminaren Strömung ist der Durchfluss vergleichsweise gering, so dass die Strömungsgeschwindigkeiten parabolisch über den Querschnitt verteilt sind. Durch die Haftbedingungen an den Wänden des durchströmten Rohrs sind die Strömungsgeschwindigkeiten dort geringer und auf der Achse maximal. Die aus der niedrigen Strömungsgeschwindigkeit in Wandnähe resultierende große Verweildauer hat einen niedrigen Temperaturgradienten an der Rohrwand zur Folge. Bei der turbulenten Strömung kommt es durch höhere Strömungsgeschwindigkeiten zu einer turbulenten Quervermischung, so dass die Temperaturgradienten in Wandnähe wesentlich höher sind als bei laminarer Strömung. Dadurch steigt der Wärmeübergangskoeffizient. Aus diesem Grund sollte sichergestellt werden, dass im Wärmeübertrager eine Strömungsgeschwindigkeit eingestellt wird, die eine turbulente Strömung zur Folge hat, um einen hohen Wärmeübertrag zu erreichen.

---

<sup>8</sup> Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verfahrenstechnische Transportprozesse (Hrsg.) S. 2



**Abbildung 2:** Temperaturverlauf beim Wärmedurchgang durch eine ebene Wand<sup>9</sup>

Zur Beurteilung der Strömung wird die Reynoldszahl verwendet. Aus einem Zweischichtenmodell der turbulenten Strömung, bei dem der Kern vollturbulent und die Unterschicht viskos ist, ergibt sich als Standardgleichung nach Gnielinski:

$$Nu_{\infty} = \frac{\left(\frac{\xi}{8}\right) Re * Pr}{1 + 12,7 \sqrt{\left(\frac{\xi}{8}\right) * (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)}} \quad (3)$$

Mit  $\xi$ : Reibungsbeiwert

Re: Reynoldszahl

Pr: Prandtl-Zahl

Der Wärmeübergang nimmt also mit zunehmender Reynoldszahl zu. Für turbulente Strömungen liegt die Reynoldszahl  $\geq 10.000$  und die Prandtl-Zahl  $> 0,6$ . Für die späteren Versuche ist empfehlenswert eine nicht zu geringe Durchflussgeschwindigkeit des Abwassers zu wählen, um das Biofilmwachstum einzuschränken. Der erzielbare Wärmeübergangskoeffizient muss experimentell ermittelt werden. Dann können Hypothesen über die vorherrschende Strömung aufgestellt werden.<sup>10</sup>

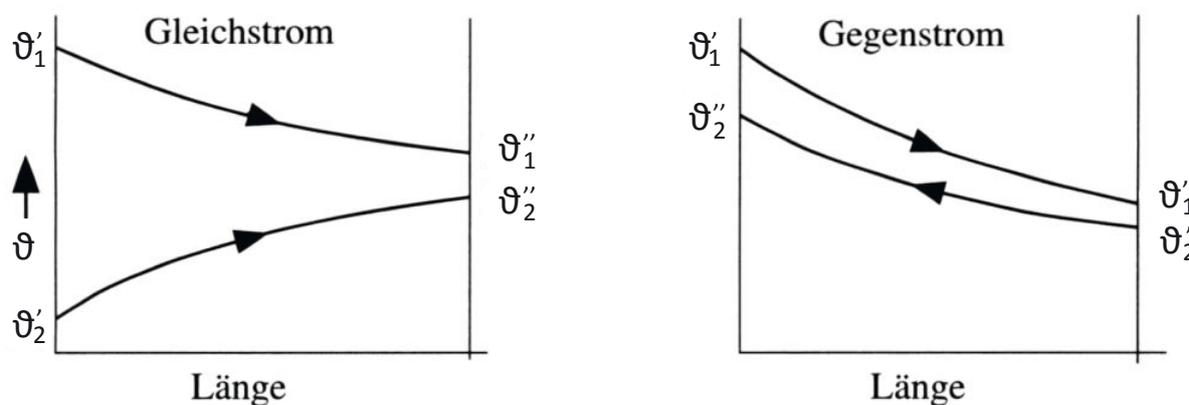
<sup>9</sup> Vgl. Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Wärmeatlas, 2013, S. 33.

<sup>10</sup> Verein deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Wärmeatlas, 10. Auflage, 2006

### 2.2.2 Gleich- und Gegenstromwärmeübertrager

Die beiden wichtigsten Grundformen von Wärmeübertragern sind der Gleichstrom- und der Gegenstromwärmeübertrager. Im Gleichstromwärmeübertrager fließen beide Massenströme in die gleiche Richtung, wie in **Abbildung 3** links schematisch dargestellt, und sorgen so dafür, dass sich die Temperaturen angleichen und ein Wärmeübertrag stattfindet. Das kalte Medium kann dabei maximal die Austrittstemperatur des warmen Fluids erreichen.

Beim Gegenstromprinzip fließen die Massenströme in entgegengesetzte Richtungen. Bei dieser Variante eines Wärmeübertragers kann das kalte Fluid zum Zeitpunkt des Austritts sogar höhere Temperaturen erreichen als das warme Medium beim Verlassen des Wärmeübertragers. Im Gegenzug wird der warme Massenstrom deutlich stärker abgekühlt, wie im rechten Teil der **Abbildung 3** zu erkennen ist. Zur Maximierung der übertragenen Wärme ist somit der Einsatz eines Gegenstromwärmeübertragers vorteilhaft.



**Abbildung 3** : Temperaturverlauf längs eines Gleichstrom- und Gegenstromwärmeübertragers<sup>11</sup>

Der Wirkungsgrad eines Wärmeübertragers wird hier auf den Fluidstrom mit dem Index 1 bezogen und ergibt sich aus dem Verhältnis des übertragenen Wärmestroms  $\dot{Q}$  zur maximal möglichen Übertragung  $\dot{Q}_{max}$ . Für einen Gegenstromwärmeübertrager ergibt sich der Wirkungsgrad nach folgender **Gleichung (4)**:

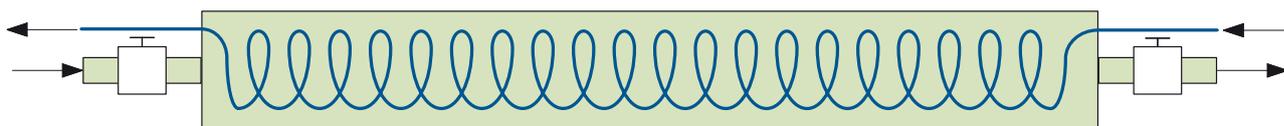
<sup>11</sup> Abbildung nach Hahne, 2010, S. 194.

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} = \frac{\vartheta'_1 - \vartheta''_1}{\vartheta'_1 - \vartheta'_2} \quad (4)$$

Mit:	$\varepsilon$	:	Wirkungsgrad	[-]
	$\vartheta'_1$	:	Eintrittstemperatur Strom 1	[K]
	$\vartheta''_1$	:	Austrittstemperatur Strom 1	[K]
	$\vartheta'_2$	:	Eintrittstemperatur Strom 2	[K]

### 2.2.3 Rohrwendel-Wärmeübertrager

Ein Rohrwendel-Wärmeübertrager besteht grundlegend aus einem Hohlzylinder und einem im Inneren geführten Rohr. Dadurch wird eine äußere und eine innere Fluidführung möglich. Der äußere Durchgang wird dabei als Mantelstrom und der innere Durchgang als Rohrstrom bezeichnet. In der vorliegenden Arbeit wird im Hinblick auf den Versuchsstand die Bezeichnung Heizwasserstrom analog zum Begriff Mantelstrom und die Bezeichnung Kühlwasserstrom analog zum Begriff Rohrstrom verwendet. Die Strömungsführung verläuft im Gegenstromverfahren, wobei der Rohrstrom in Wendeln durch den Mantelstrom geführt wird (vgl. **Abbildung 4**). Durch ihre einfache Bauart sind Rohrwendel-Wärmeübertrager leicht zu reinigen und kostengünstig herzustellen.

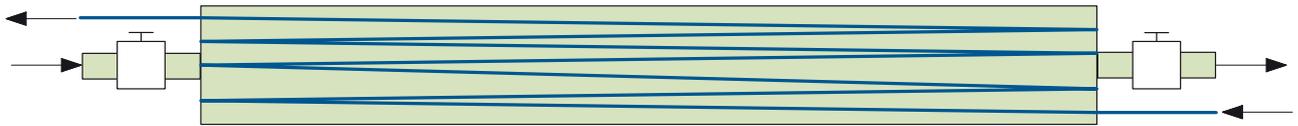


**Abbildung 4** : Skizze eines Rohrwendel-Wärmeübertragers

### 2.2.4 Rohrbündel-Wärmeübertrager

Rohrbündel-Wärmeübertrager kommen aufgrund ihrer verhältnismäßig einfachen Herstellung in zahlreichen Industriezweigen zum Einsatz. Sie bestehen ähnlich wie der Rohrwendel-Wärmeübertrager aus einem Hohlzylinder. In dessen Inneren befindet sich in diesem Fall jedoch eine größere Anzahl an Rohren. So kann ein Rohrbündel-Wärmeübertrager grundlegend in einen äußeren und mehrere innere Durchgänge unterteilt werden. Dabei kann der Rohrstrom den Mantelstrom im Gleichstrom,

Gegenstrom oder, wie in **Abbildung 5** dargestellt, als Kombination aus beidem durchfließen.



**Abbildung 5** : Skizze eines Rohrbündel-Wärmeübertragers

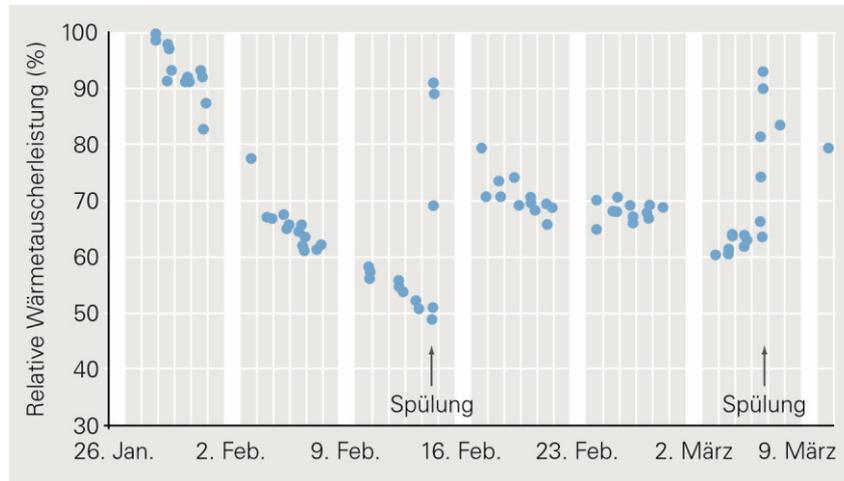
### 2.3 Verschmutzungen auf Wärmeübertragern

Prinzipiell beinhalten alle nichtsterilen technischen Wassersysteme Verschmutzungen, aber nicht in jedem System haben Verschmutzungen Auswirkungen auf den Betrieb. Aufgrund der geringen Auswirkung werden diese häufig nicht identifiziert.<sup>12</sup> Besonders interessant bei der Beurteilung von Verschmutzungen sind Abwasserwärmeübertrager, denn die zusätzliche Schicht auf der Oberfläche in Form eines Biofilms beeinflusst die Eigenschaften eines Wärmeübertragers enorm.

Wie vorab gezeigt bietet häusliches Abwasser ein hohes energetisches Potential. Aufgrund der hohen Nährstoffkonzentration innerhalb des Abwassers bildet sich auf der Oberfläche von Wärmeübertragern, die in Abwasser eingebracht werden, ein Biofilm, der die Wärmeübertragerleistung deutlich mindert. Biofilme entstehen aus einer Schleimschicht und entstehen wenn Mikroorganismen sich auf Grenzflächen ansiedeln.

In einer Studie aus dem Jahr 2004 untersuchte WANNER, O. das Biofilmwachstum auf Wärmeübertragern in öffentlichen Abwasserkanälen. Im Rahmen dieser Studie wurde festgestellt, dass sich Bakterien bereits nach wenigen Stunden auf der Oberfläche des Wärmeübertragers ansiedeln und nach einigen Tagen ein mehrere hundert Mikrometer dicker Biofilm entsteht. Bei einer Durchflussgeschwindigkeit von 0,4 m/s wurde so eine Wärmeübertragsminderung von 50% nach 18 Tagen gemessen. Nachdem die Durchflussgeschwindigkeit jedoch auf 1,0 m/s erhöht wurde, lösten sich Teile des Biofilms und die Wärmeübertragsminderung konnte auf 20% im Langzeittest reduziert werden.

<sup>12</sup> Vgl. Flemming et. al., 2011, S. 85.



**Abbildung 6:** Relativer Verlauf der Wärmeübertragerleistung<sup>13</sup>

In **Abbildung 6** ist die relative Wärmeübertragerleistung in Abhängigkeit der Zeit aufgetragen. Es zeigt sich, dass die Wärmeübertragerleistung innerhalb weniger Tage um 50 Prozent reduziert wird. Nach einer Erhöhung der Fließgeschwindigkeit kann die Übertragerleistung wieder auf über 90 Prozent angehoben werden.

Mit dem Begriff „Biofilm“ werden alle Ansammlungen von Mikroorganismen an Grenzflächen beschrieben.<sup>14</sup> Dabei bilden sie extrazelluläre polymere Substanzen (EPS), welche auch als „Schleimsubstanzen“ bezeichnet werden, ein Gel, in welches Mikroorganismen eingebettet sind. Aufgrund der rauen Oberfläche von Biofilmen wird die Anhaftung weiterer Teilchen erleichtert und der Strömungswiderstand eines Fluids erhöht.<sup>15</sup> Biofilm-Populationen entwickeln sich in Abhängigkeit vom Nährstoffangebot aus dem Werkstoff und dem Medium sowie der Temperatur. Daher unterscheiden sie sich in ihrer Zusammensetzung und Diversität. Die Verfügbarkeit organischen Materials bedingt also das quantitative Wachstum und das Spektrum an Biofilm-Organismen.<sup>16</sup>

Häufig wird unterschieden zwischen „Oberflächenbesiedlung“, was die sich auf wasserbenetzten Oberflächen ausbildende Biomasse beschreibt, und „Oberflächenbewuchs“, welcher aus den heranwachsenden Mikroorganismen und EPS besteht. Nach dieser Definition ist beides auf einen Biofilm zurückzuführen und es wird lediglich eine quantitative und im Hinblick auf das Wachstum zeitliche Unterscheidung getroffen.<sup>17</sup>

<sup>13</sup> (Vgl. EAWAG, 2005)

<sup>14</sup> Vgl. Bürschgens, et. al., 2015, S. 17.

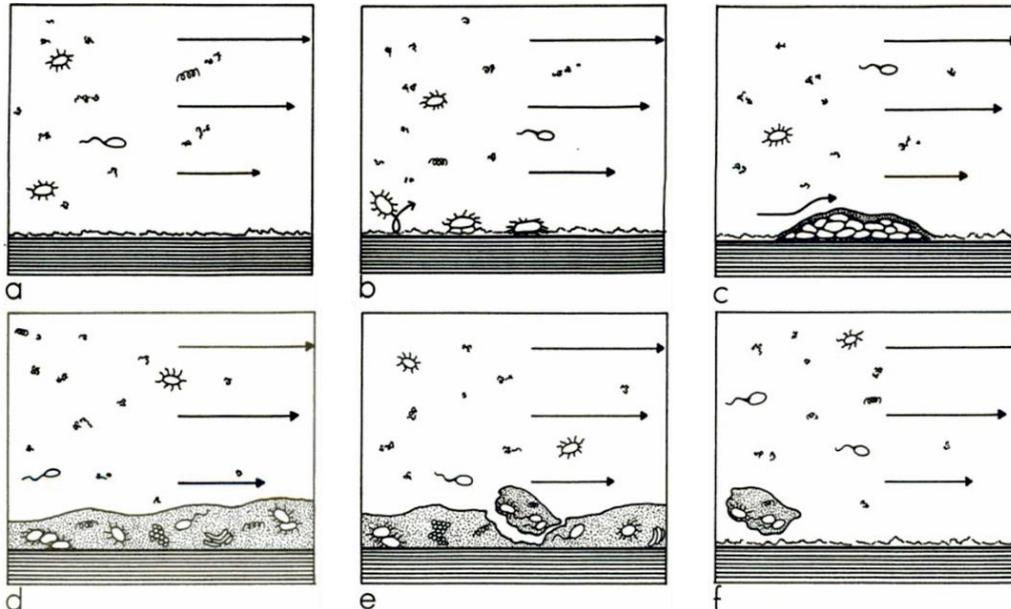
<sup>15</sup> Vgl. Marquardt, 1994, S. 29.

<sup>16</sup> Vgl. Kistemann et. al., 2012, S. 26.

<sup>17</sup> Vgl. DVGW e.V.; 2007, S. 6.

Im Vergleich zu einem Biofilm beschreibt der Begriff „Fouling“ die Ansammlung von unerwünschtem Material (Ablagerungen) auf Wärmeübertrageroberflächen. Unerwünschte Materialien können Kristalle, Sedimente, Polymere, anorganische Salze, biologische Anwachsungen, Korrosionsprodukte und vieles mehr sein.<sup>18</sup> Der Gesamtprozess des Foulings ist sehr komplex, weil sowohl Wärme-, Massen- und Strömungsübertragung als auch chemische Reaktionen parallel ablaufen. Um also den tatsächlichen Fouling-Prozess zu verstehen, muss er in seine Einzelteile zerlegt und die auftretenden Prozesse im Detail untersucht werden. Es gibt eine Vielzahl an unterschiedlichen Arten des Foulings. Hierzu zählen das Kristallisationsfouling, das Gefrier- oder Erstarrungsfouling, das Partikelfouling, das Reaktionsfouling, das Korrosionsfouling, das Biofouling und kombinierte Arten des Fouling.<sup>19</sup>

Für den Einsatz von Wärmeübertragern im Abwasser ist vor allem das Biofouling von Bedeutung. Es beschreibt die ungewünschte Anlagerung von biologischem Material auf Oberflächen.<sup>20</sup> Biofouling ist operational definiert und unterliegt keinen wissenschaftlichen Standards. Es existiert, sobald eine bestimmte Toleranzschwelle erreicht bzw. überschritten wird. Somit ist ein Biofilm auch unterhalb einer oben genannten Schwelle vorhanden, jedoch beeinflusst dieser das System nur in einer so geringen Weise, dass die Auswirkungen unbeachtet bleiben. Biofouling ist also auf eine Erhöhung des bisher noch tolerablen Niveaus der Biofilm-Entwicklung zurückzuführen.<sup>21</sup>



**Abbildung 7** : Entwicklung und Ausbreitung eines Biofilms in einem Wassersystem<sup>22</sup>

<sup>18</sup> Vgl. Shah, et. al., 2003, S. 863 f.

<sup>19</sup> Vgl. Schlünder, 1983, S. 3.17.2-1 ff.

<sup>20</sup> Vgl. Flemming et. al., 2008, S. V.

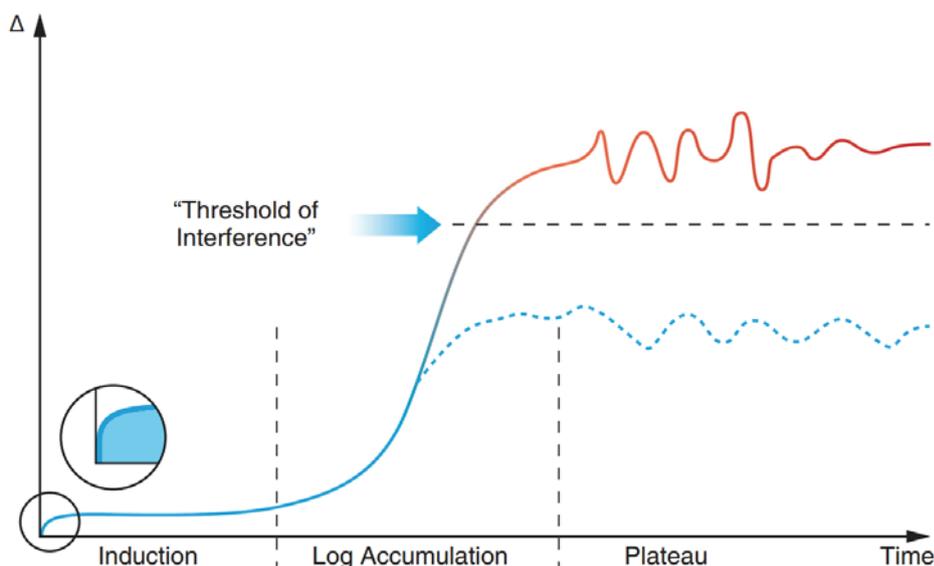
<sup>21</sup> Vgl. Flemming et. al., 2011, S. 85.

<sup>22</sup> Abbildung Marquardt, 1994, S. 30.

In **Abbildung 7** ist der Ablauf des Biofouling-Vorgangs dargestellt. Dabei kann der Prozess der Anlagerung eines Biofilms und dessen Wachstum in sechs Schritten beschrieben werden.<sup>23</sup>

- a) Conditioning film
- b) Reversible und irreversible Adhäsion
- c) Mikrokolonien
- d) Reifer Biofilm
- e) Ablösung einzelner Bestandteile
- f) Weitere Ausbreitung

Die Erstanhaftung entsteht rein zufällig. Wenn sich Mikrozellen auf Oberflächen anhaften, beginnen sie sich zu teilen und zu vermehren. Dieses Stadium des Biofilmwachstums ist reversibel und Mikromoleküle können sich selbstständig ablösen und an anderer Stelle erneut anlagern, falls das umliegende Milieu nicht ideal ist.<sup>24</sup> Durch Alterung oder durch Überwindung der Haftkräfte lösen sich zu einem späteren Zeitpunkt auch ganze Teile aus der Matrix, werden fortgeschwemmt und lagern sich an anderer Stelle erneut an. Dort beginnt eine Neubesiedelung. Die Dicke von Biofilmen in Abwassersystemen variiert von wenigen Mikrometern bei starker Scherbelastung bis hin zu Zentimetern in schwach durchströmten Bereichen. Die Entstehung eines Biofilms lässt sich in drei Stadien unterteilen.<sup>25</sup> (vgl. **Abbildung 8**).



**Abbildung 8** : Zeitlicher Verlauf des Biofilmwachstums,  $\Delta$ = Dicke des Biofilms<sup>26</sup>

<sup>23</sup> Vgl. Marquardt, 1994, S. 30.

<sup>24</sup> Vgl. Birkenhauer et. al., 2015, S. 87.

<sup>25</sup> Vgl. Flemming et. al., 1994, S. 36.

<sup>26</sup> Abbildung Flemming et. al., 2011, S. 85.

Wird eine Oberfläche mit Wasser benetzt, so entsteht ein sogenannter „conditioning film“ durch eine irreversible Adsorption von Makromolekülen (Induction/ Induktionsphase). Zunächst ist diese Oberflächenbesiedelung noch reversibel und Mikroorganismen können bereits durch geringe Scherkräfte entfernt werden. Mit voranschreitender Entwicklung kommt es zu einer irreversiblen Adhäsion der Zellen und sie beginnen EPS zu produzieren. Darauf folgt die Wachstumsphase vorhandener Zellen zusammen mit der Adsorption neuer Mikroorganismen (Log Accumulation/ Wachstumsphase). Hier sind besonders die Nährstoffverhältnisse und Temperaturen relevant. Dabei verändern sich das Porenvolumen des Biofilms und damit auch das Fließverhalten in einem System. Darauf folgt die Plateau-Phase, in welcher sich der Zuwachs und Ablösungen in etwa die Waage halten.<sup>27</sup>

Bei dem Betrieb einer technischen Anlage muss ein Grenzwert definiert werden, ab dem Biofouling beginnt. Danach sollte eine Eingriffsschwelle (Threshold of Interference) nach ökonomischen Gesichtspunkten gewählt werden, sodass der bestehende Biofilm toleriert werden kann, ohne einen inakzeptablen Leistungsverlust der Anlage einzubüßen. Um den Biofilm auf einem solchen Level zu halten, kommen chemische oder auch mechanische Verfahren zum Einsatz.<sup>28</sup>

In dem vorliegenden Projekt liegt ein weiterer Schwerpunkt auf der Reduzierung des Wärmedurchgangs zwischen zwei Medien als Folge der zusätzlichen Schicht des Biofilms auf dem Wärmeübertrager. Biofilme haben in etwa die gleiche Wärmeleitfähigkeit wie Wasser. Damit ist sie etwa 27mal niedriger als die von Edelstahl gleicher Dicke. Ein Biofilm verhindert damit die Konvektion an der Oberfläche und somit den Wärmedurchgang durch ein Material wie Edelstahl bereits bei geringer Dicke signifikant.<sup>29</sup> Außerdem wird der Reibungswiderstand durch einen Biofilm aufgrund seiner viskoelastischen Eigenschaft erhöht. Der dadurch erzeugte Druckverlust in Wärmeübertragern wird in der Literatur im Vergleich zur Zunahme des Wärmeübergangswiderstandes als technisch und wirtschaftlich noch erheblicher angesehen. Eine zusätzliche Gefahr sind abgerissene Biofilm-Fetzen eines Oberflächenbewuchses, welche in Anlagen zu weiteren Störungen führen können, wenn z. B. Elektroden abgedeckt oder Ventile oder Schieber verstopft werden.<sup>30</sup>

Aus anlagentechnischer Sicht ist das Gesamtergebnis des Fouling-Prozesses auf einem Wärmeübertrager eine Veränderung des Wärmeübergangswiderstandes. Zur Beschreibung wird die Ablagerung in Form eines Fouling-Widerstandes als thermischer Widerstand ausgedrückt. Er beschreibt den durch die Ablagerung verursachten

---

<sup>27</sup> Vgl. Hunze, 2005, S. 186 ff.

<sup>28</sup> Vgl. Flemming, et. al., 2011, S. 85.

<sup>29</sup> Vgl. Flemming, et. al., 1994, S. 31.

<sup>30</sup> Vgl. Flemming, et. al., 1994, S. 35.

zusätzlichen Wärmedurchgangswiderstand. Hierdurch ergibt sich ein auf eine Rohraußenseite bezogener Wärmedurchgangskoeffizient nach der **Gleichung (5)**.<sup>31</sup>

$$k = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_i} + R_{f1}\right) * \frac{d_a}{d_i} + \frac{d_a}{2 * \lambda} * \ln\left(\frac{d_a}{d_i}\right) + \frac{1}{\alpha_a} + R_{f2}} \quad (5)$$

Mit:	$k$	:	Wärmedurchgangskoeffizient	[W/m <sup>2</sup> *K]
	$R_f$	:	Fouling-Widerstand	[m <sup>2</sup> *K/W]
	$\alpha$	:	Wärmeübergangswiderstand	[W/m <sup>2</sup> *K]
	$d$	:	Rohrdurchmesser	[m]
	$\lambda$	:	Wärmeleitfähigkeit	[W/m*K]

Die Fouling-Widerstände sind in der Regel nicht bekannt und werden anhand von Literaturwerten ähnlicher thermischer und hydrodynamischer Bedingungen abgeschätzt. Die Werte beschränken sich meist auf eine im Handbuch der Tabular Exchanger Manufacturers Association (TEMA) angegebene Tabelle mit rund 100 Werten (vgl. **Tabelle 1**). Diese Tabelle wurde 1941 veröffentlicht und seither nicht wesentlich verändert.

<sup>31</sup> Vgl. Müller-Steinhagen, H., 2001, S. 6.

**Tabelle 1:** Auszug der TEMA Fouling-Widerstände für Wasser und andere Fluide in  $(\text{m}^2 \text{K})/\text{W}^{32}$ 

Bedingungen	Kühlwasser < 50 ° C		Kühlwasser > 50 ° C	
	Heizwasser < 120 ° C		Heizwasser > 120 ° C	
Fließgeschwindigkeit	v < 1 m/s	v > 1 m/s	v < 1 m/s	v > 1 m/s
Art des Wassers				
Meer	0.00009	0.00009	0.00018	0.00018
Brackwasser	0.00035	0.00018	0.00053	0.00035
Stadtnetz	0.00018	0.00018	0.00035	0.00035
Fluss (Durchschnitt)	0.00053	0.00035	0.00070	0.00035
Organ. Wärmeträger	0.00018	0.00018	0.00018	0.00018
Destilliert	0.00009	0.00009	0.00009	0.00009

Im Zusammenhang mit diesen Tabellenwerten ergibt sich eine Reihe von Fragestellungen. So geben die Tabellen häufig keine genaue Auskunft über die vorherrschenden Prozessbedingungen wie Strömungsgeschwindigkeit, Fluidtemperatur, Wärmestromdichte und Fluidzusammensetzung, obwohl diese Parameter einen bedeutenden Einfluss auf das Fouling-Verhalten haben. Außerdem gibt es keine Angabe über das zeitliche Intervall, in welchem der Fouling-Widerstand erreicht wird. Zusätzlich bietet die Tabelle keine Möglichkeit, eine zeitliche Veränderung des Fouling-Widerstandes zu berücksichtigen. Weiterhin gelten die Tabellenwerte hauptsächlich für die Strömung von Wasser oder Kohlenwasserstoffen, wodurch eine Vielzahl von Prozessen, bei denen Fouling auftritt, nicht berücksichtigt werden.<sup>33</sup>

Einzelne Hersteller, darunter „Volverine Tube, Inc“, haben diese Kritikpunkte aufgegriffen. So wurden die TEMA-Werte für typische Prozessanwendungen im „Volverine Tube Heat Transfer Data Book“ angepasst und weiter nach der Temperatur des heizenden Mediums bzw. des Wassers und nach der Strömungsgeschwindigkeit untergliedert.<sup>34</sup>

<sup>32</sup> Vgl. TEMA INC., 1999, S. 290

<sup>33</sup> Vgl. Müller-Steinhagen, 2001, S. 6.

<sup>34</sup> Vgl. Wolverine Tube. INC., 2001, S. 50.

In der Praxis wird der Fouling-Widerstand häufig von Betreibern fälschlicher Weise überspezifiziert, um Unregelmäßigkeiten vorzubeugen, Abweichungen vom Verfahren einzubeziehen oder sich bei der Auslegung des Übertragers gegen Unsicherheiten abzusichern. Diese „Sicherheitszuschläge“ stehen dabei in keinem Zusammenhang mit dem tatsächlichen Ablagerungsproblem.<sup>35</sup> Wird bei der Auslegung einer Anlage der Fouling-Widerstand sehr hoch angesetzt, so wird eine Anlage konstruiert, welche wesentlich mehr zu Verschmutzungen neigt als eine Anlage, welche mit niedrigen Fouling-Widerständen dimensioniert wurde.<sup>36</sup>

Im Kraftwerksbau wird der Cleanliness Factor (CF) als Verhältnis der Wärmedurchgangskoeffizienten im verschmutzten und sauberen Zustand verwendet, um eine Aussage über die Wärmeübertragsreduktion treffen zu können. CF ist eine rein empirische Größe und wird unter der Annahme identischer Randbedingungen für den verschmutzten und sauberen Zustand berechnet.<sup>37</sup>

### 2.3.1 Anti-Fouling Strategien

Um die Gründe für einen Biofilmwachstum zu ermitteln, ist es sinnvoll zunächst die Grundlagen des Biofilmwachstums und der Biofilmentwicklung genauer zu verstehen, denn diese sind der Schlüssel zu nachhaltigen Anti-Fouling-Strategien. Grundlegend wirken dabei unter anderen folgenden Faktoren Biofilm-destabilisierend<sup>38</sup>:

- Mechanische Kräfte
  - Scherkräfte des Wassers
  - Mechanisch-abrasive Behandlung
  - Kontraktion durch Temperaturstress
- Ultraschall
- Glatte Unterlage
- Nährstoffsituation
- Oxidierende Stoffe

Um eine Verminderung der Ablagerungsbildung auf Wärmeübertragern zu erzielen und so die Auswirkungen von Verschmutzung auf einem tolerablen Niveau zu halten, existieren chemische und mechanische Verfahren.

---

<sup>35</sup> Vgl. Müller-Steinhagen, 2001, S. 7.

<sup>36</sup> Vgl. Verein Deutscher Ingenieure, 2006, Od 14.

<sup>37</sup> Vgl. Schlünder, 1983, S. 3.17.1-2.

<sup>38</sup> Vgl. Flemming, 2013, S. 151.

Wie vorab beschrieben hängt ein Biofilmwachstum von der Verfügbarkeit organischen Materials ab. So besteht eine Möglichkeit das Wachstums zu unterbinden darin, den Nährstoffgehalt im Fluid zu reduzieren. Dies lässt sich durch Zugabe von Chemikalien erreichen. Weiterhin lassen sich auf diese Weise die Löslichkeit im Trägerfluid erhöhen, die Haftkräfte an der Heizfläche verringern oder das Kristallwachstum verlangsamen, wodurch eine Ablagerungsbildung reduziert wird.<sup>39</sup>

Im Zusammenhang mit Flüssigkeitsströmungen gibt es eine Vielzahl an Unternehmen, die sich auf eine chemische Bekämpfung von Fouling und Korrosion spezialisiert haben. Die Dosierung und der Einsatz der Chemikalien hängen stets von dem speziellen Fouling-Problem ab. Das Behandlungsverfahren sollte spezialisierten Unternehmen überlassen werden.<sup>40</sup>

Biofouling wird bei der Anwendung chemischer Verfahren durch eine Zugabe von Bioziden bekämpft. In der Vergangenheit kam dazu fast ausschließlich das Oxidationsmittel Chlor zum Einsatz. Eine weitere Möglichkeit, Bakterienbildung zu reduzieren, ist die Verwendung von Rohren mit einem Kupfergehalt über 60 %.<sup>41</sup>

Mechanische Verfahren zur kontinuierlichen Verminderung der Ablagerungsbildung basieren auf den Mechanismen der Überhitzung der Heizflächen, der mechanischen oder akustischen Vibration oder der erhöhten Schubspannung an der Feststoff-Fluid-Phasengrenze.

Aus konstruktiven Gründen ist es in vielen Anwendungsfällen schwieriger, ein mechanisches Verfahren anzuwenden, als ein chemisches Additiv einzubringen. Chemische Methoden verursachen dabei zwar geringere Investitionskosten, haben aber meist höhere Betriebskosten im Vergleich zu mechanischen Verfahren.<sup>42</sup> Bei einem Einsatz von Chemikalien muss die Konzentration der einzelnen Bestandteile sorgfältig kontrolliert werden. Toleranzgrenzen der Konzentrationen dürfen nicht überschritten werden, damit eine Aufbereitung vor der Rückführung in den natürlichen Kreislauf erspart bleibt.<sup>43</sup>

Bei den meisten Fouling-Mechanismen nehmen die Ablagerungsraten mit Anstieg der Wandschubspannung und Abnahme der Wandtemperatur ab. Eine regelmäßige Umkehr der Strömungsrichtung oder eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit werden daher verwendet, um lockere Ablagerungen zu entfernen und Partikel abzuspielen. Dadurch kann der Fouling-Widerstand für einige Zeit vermindert werden.

---

<sup>39</sup> Vgl. Verein Deutscher Ingenieure, 2006, Od17.

<sup>40</sup> Vgl. Verein Deutscher Ingenieure, 2006, Od18.

<sup>41</sup> Vgl. Verein Deutscher Ingenieure, 2006, Od19.

<sup>42</sup> Vgl. Verein Deutscher Ingenieure, 2006, Od17.

<sup>43</sup> Vgl. Verein Deutscher Ingenieure, 2006, Od20.

---

Durch eine Beschichtung der Oberfläche mit Teflon oder Keramik oder durch Polieren von Heizflächen kann eine Verlängerung der Betriebszeit erreicht werden. Außerdem ist davon auszugehen, dass die Reinigung aufgrund geringerer Haftkräfte leichter sein wird.

Der Einsatz eines fest installierten Turbulenzerzeugers kann den Wärmeübergangskoeffizienten erheblich erhöhen, führt allerdings auch zu einem überproportional erhöhten Druckverlust. Eine Alternative stellt das Spirelf Verfahren dar. Bei diesem Verfahren kommt ein flexibler Edelstahlwendel zum Einsatz, die durch die Strömung in Rotation versetzt wird und so Turbulenzen um den Wärmeübertrager erzeugt.

Bei der Anwendung des Bürstenverfahrens werden kleine Bürsten von der Strömung durch die Rohre gedrückt, um diese zu reinigen. Weil dieses Verfahren bei schwachen Ablagerungen weniger wirksam ist, kommt das Schwammkugelverfahren zum Einsatz. Dabei werden kontinuierlich kleine Schwämme mit rauer Oberfläche durch die Rohre gedrückt. Der Durchmesser sollte den des Rohres leicht übersteigen, um eine gründliche Reinigung sicherzustellen. Für beide Verfahren werden enorme Umbauten und Investitionen notwendig. Dennoch ist das Verfahren besonders bei starken Fouling-Problemen sehr wirksam.<sup>44</sup>

Beim Betrieb von Anlagen liegen Störungen häufig an Fehlern konventioneller Anti-Fouling Maßnahmen.<sup>45</sup> Häufig gemachte Fehler sind:

- Keine Frühwarnsysteme: Biofouling führt zu Leistungsverlusten von Anlagensystemen.
- Keine Informationen über Biofilmort und -umfang: Es werden lediglich Wasserproben gezogen, aber keine Oberflächen überprüft.
- Desinfektion wird als Gegenmaßnahme durchgeführt: Hier kann nicht von einer Reinigung gesprochen werden. In den meisten Fällen wird das Problem durch Biomasse herbeigeführt, egal ob diese abgestorben ist oder nicht.
- Es wird keine Einschränkung der Nährstoffversorgung berücksichtigt: Nährstoffe sind potentielle Biomasse.
- Keine Optimierung von Gegenmaßnahmen: Ein Wirkungsgrad wird nur anhand von Prozess- und Produktqualität erfasst.

---

<sup>44</sup> Vgl. Verein Deutscher Ingenieure, 2006, Od 21.

<sup>45</sup> Vgl. Flemming, H.-C., 2008, S. 3 f.

Dennoch findet der wichtigste Schritt für einen störungsfreien Anlagenbetrieb bereits in der Konstruktionsphase statt. So sollte stets eine geeignete Bauart ausgewählt und günstige Betriebsbedingungen, wie z.B. hohe Strömungsgeschwindigkeiten und niedrige Heizflächentemperaturen, angestrebt werden. Weiterhin sollte eine möglichst optimale Wärmeübertragerkonstruktion ausgeführt werden.<sup>46</sup>

### 2.3.2 Reinigungsverfahren für verschmutzte Wärmeübertrager

Auch unter der Anwendung von Anti-Fouling Maßnahmen kann es durch die Umstände oder gemachte Fehler zu starken Verschmutzungen kommen, sodass eine Reinigung notwendig wird. Analog zu den Anti-Fouling Maßnahmen werden auch die Reinigungsverfahren für verschmutzte Wärmeübertrager in chemischen und mechanischen Reinigungsverfahren untergliedert.

Im direkten Vergleich zu mechanischen Reinigungsverfahren bieten chemische Reinigungsverfahren deutliche Vorteile, was Schnelligkeit, Effizienz, Arbeitsintensität, Gründlichkeit und Beschädigungsfreiheit betrifft. Weiterhin ist stets eine On-Stream Reinigung anzustreben, bei der der Wärmeübertrager nicht außer Betrieb genommen werden muss und so teure Standzeiten vermieden werden können.<sup>47</sup>

Als mechanisches On-Stream Reinigungsverfahren können bei lockeren Ablagerungen mittels „air rumbling“ Ablagerungen durch erhöhte Turbulenz und Wandschubspannung verringert werden. Bei diesem Verfahren wird Luft in das den Wärmeübertrager durchströmende Fluid eingeblasen.

Bei der Großzahl der mechanischen Reinigungsverfahren muss jedoch der Wärmeübertrager aus dem Betriebskreislauf ausgebaut und geöffnet werden (Off-Stream). Die Reinigung erfolgt im Anschluss mittels Wasser- oder Dampfstrahlern und kann durch den Zusatz von Sand zum Druckwasser noch verstärkt werden. Weiterhin kommen Schaber und Bohrer zum Einsatz, wobei stets darauf zu achten ist, dass die zu reinigende Fläche nicht beschädigt wird.<sup>48</sup>

---

<sup>46</sup> Vgl. Verein Deutscher Ingenieure, 2006, Od16.

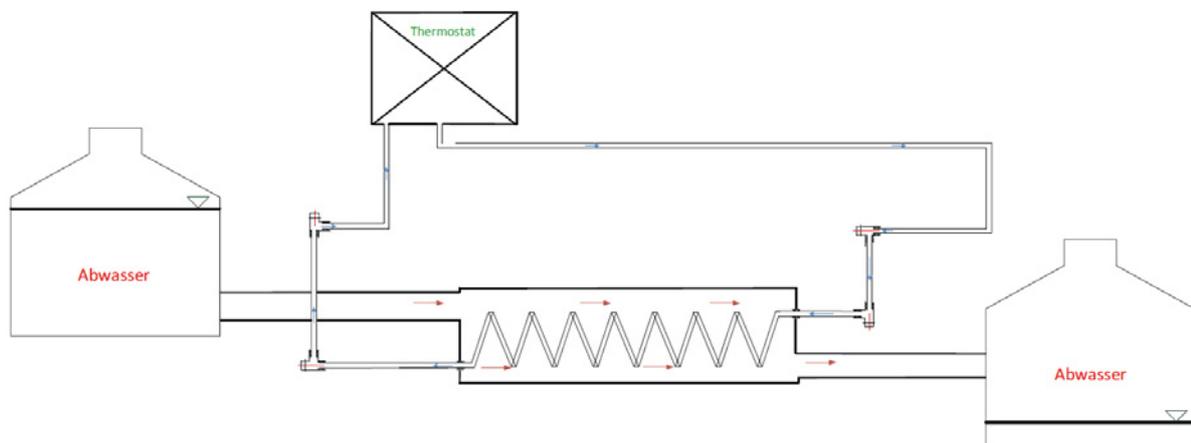
<sup>47</sup> Vgl. Verein Deutscher Ingenieure, 2006, Od 24.

<sup>48</sup> Vgl. Verein Deutscher Ingenieure, 2006, Od 26.

### 3 Aufbau des Versuchsstands

Aufgrund der unklaren Kenntnis der Wärmeübertragsreduktion sind die korrekte Auslegung und damit auch der effiziente Betrieb einer dezentralen Abwasserwärmerückgewinnungsanlage deutlich erschwert. Daher wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ein Versuchsstand konzipiert, der es ermöglicht das Biofilmwachstum auf Wärmeübertragern ausreichend genau zu ermitteln. Der Versuchsstand wurde auf dem Gelände der RWTH Aachen aufgebaut und so dimensioniert, dass eine ausreichende Messgenauigkeit erreicht werden kann. Daher ist es notwendig, dass insbesondere der Wärmeübertrager deutlich größer ausfällt als ursprünglich beantragt.

In **Abbildung 9** ist eine Grobübersicht des Versuchsstandes dargestellt. Das Abwasser wird in einem Abwasserbehälter gesammelt und auf eine definierte Temperatur vorerwärmt. Anschließend wird das Abwasser durch ein KG-Rohr mit einem Durchmesser von 20 cm geführt. Innerhalb dieses KG-Rohres wird ein Wärmeübertrager, der dem Abwasser Energie entzieht, im Gegenstromprinzip angeordnet. Innerhalb des Wärmeübertragers fließt Klarwasser. Das Klarwasser wird durch das Thermostat auf einer konstanten Temperatur gehalten.



**Abbildung 9:** Grobübersicht Versuchsstand

#### 3.1 Gesamtübersicht über den Versuchsstand

Um Leistungsüberprüfungen und Entwicklungstests des Wärmeübertragers unabhängig von der Abwasserbeschaffenheit durchzuführen, wurde ein Indoor-Prüfstand gebaut. Im vorliegenden Kapitel werden der genaue Aufbau und die Komponenten des Prüfstands beschrieben. Bei dem Bau des Versuchsstands wurde besonderer

Wert auf konstante Vorlauftemperaturen im Frischwasserfluss gelegt. Außerdem werden so möglichst konstante Volumenströme gewährleistet.

In **Abbildung 10** ist eine Gesamtübersicht über den Versuchsstand dargestellt. Das Abwasser wird in einem Abwassertank vorerwärmt und anschließend mittels hydrostatischem Druck durch das KG-Rohr mit innenliegendem Wärmeübertrager geleitet. Innerhalb des Speichers wird das Abwasser erhitzt und umgewälzt. Mittels des Notüberlaufs und der hydraulischen Weiche wird der hydrostatische Druck über einen Versuchszeitraum konstant gehalten. Dadurch können gleichmäßige Volumenströme des Abwassers gewährleistet werden. Die Abwassertemperatur wird jeweils am Ein- und am Austritt redundant gemessen. Der Wärmeübertrager selber wird mittels eines Thermostats mit kaltem Klarwasser durchströmt. Auch die Klarwassertemperaturen werden jeweils beim Ein- und beim Ausströmen redundant gemessen. Der Klarwasser- und Abwasservolumenstrom werden jeweils durch MIDs erfasst.

Der Versuchsstand wurde mit insgesamt drei Wärmeübertragern ausgestattet, die durch den parallelen Aufbau jeweils einzeln durchströmt und vermessen werden können.

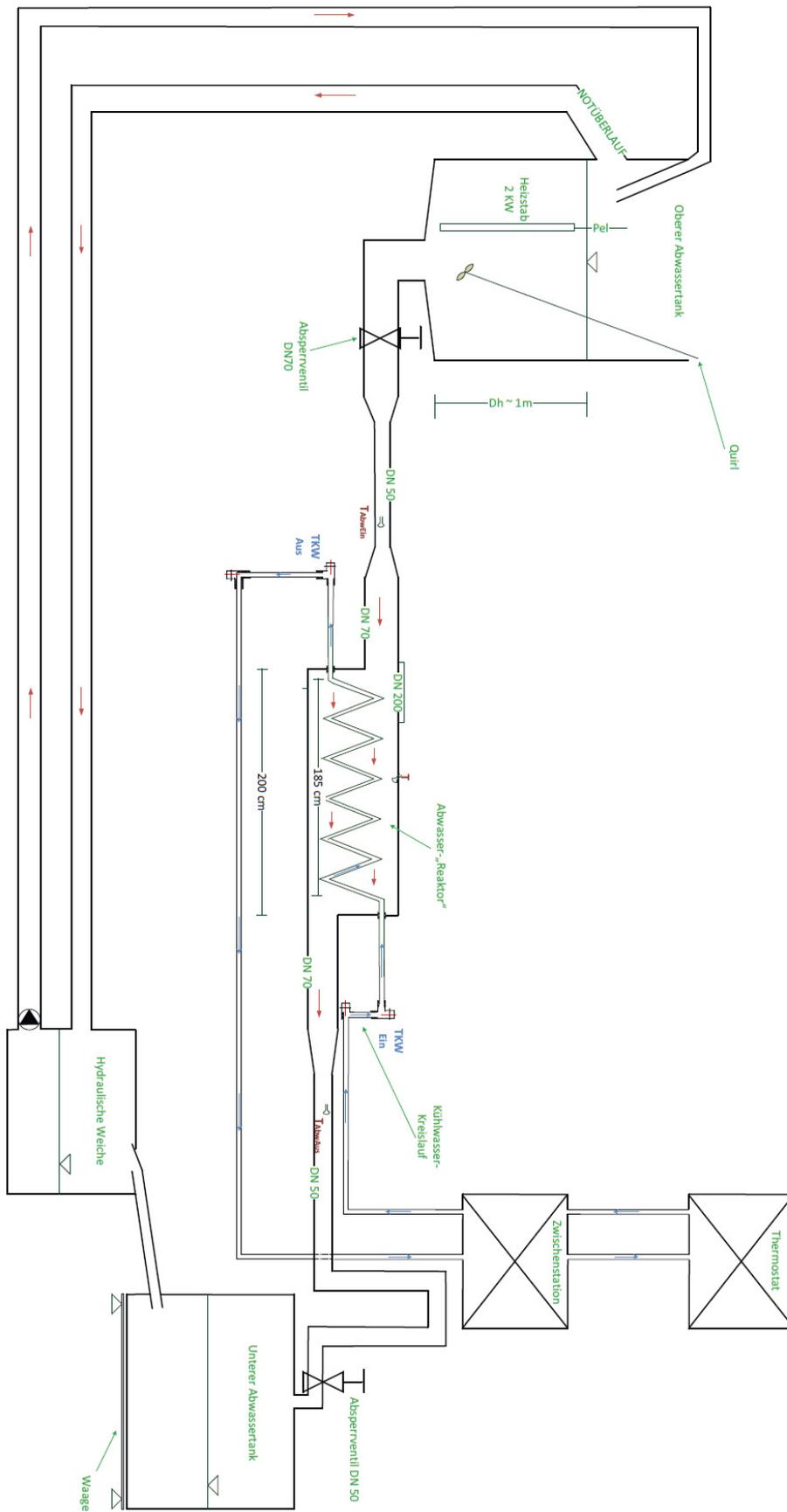


Abbildung 10: Gesamtübersicht Versuchsstand

Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen den Prüfstand, mit welchem der Einfluss der Anlagerung eines Biofilms auf die Leistung des Wärmeübertragers untersucht wird. Im Vorfeld der Versuchsreihe mit Abwasser wurden mit dem Versuchsstand Vorversuche mit Klarwasser zur Kalibrierung der Messinstrumente durchgeführt. Der Versuchsstand wurde so dimensioniert, dass eine ausreichende Messgenauigkeit erreicht werden kann. Darauf aufbauend werden Abwasserversuche durchgeführt, wofür der Versuchsstand modifiziert werden musste. Der Versuchsaufbau kann modular um zusätzliche Wärmeübertrager erweitert werden.



Abbildung 11 : Versuchsstand auf dem RWTH-Gelände<sup>49</sup>

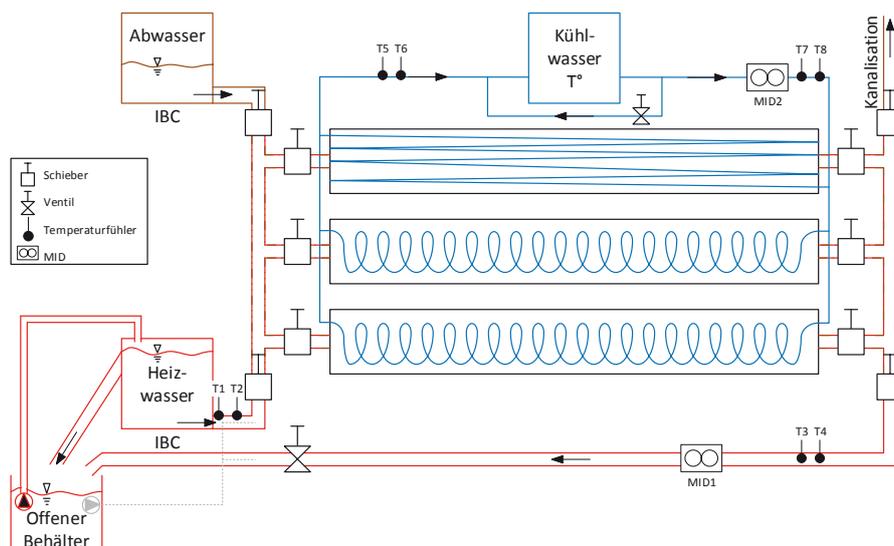


Abbildung 12 : Schematische Darstellung des Versuchsstands

Der Versuchsaufbau besteht aus drei Kreisläufen. Über den Abwasserkreislauf (braun gestrichelt) werden die drei Wärmeübertrager mit Abwasser befüllt bzw. das Abwasser aus den Wärmeübertragern in die Kanalisation abgelassen.

Aus dem IBC des Heizkreislaufs zirkuliert das vorerwärmte Heizwasser (rot) mittels hydraulischem Druck durch das System. Über die Stellung der Schieber können die Wärmeübertrager sowohl gleichzeitig als auch unabhängig voneinander durchströmt werden. Danach fließt das Wasser zunächst in den offenen Behälter und wird von dort zurück in den Heizwasser IBC gepumpt. Um einen konstanten Wasserstand im IBC zu gewährleisten und damit einen konstanten Durchfluss im System zu erzeugen, bedient man sich eines Bypasses. So wird während der Versuchsdurchführung mit einer Pumpe stetig Wasser in den IBC gefördert. Überlaufendes Abwasser wird über den Bypass zurück in den offenen Behälter geführt. Dadurch wird ein konstanter, hydrostatischer Druck gehalten und somit ein konstanter Durchfluss im Heizwassersystem gewährleistet.

Der Kühlwasserkreislauf (blau) wird durch ein Thermostat mit Pumpe angetrieben. Diese temperiert das Kühlwasser auf eine vordefinierte Temperatur und fördert einen konstanten Volumenstrom.

Um diesen dennoch variieren zu können, wird auch hier ein Bypass verwendet. So wird ein Teil des Kühlwassers direkt dem Rücklauf zum Thermostat hinter dem Wärmeübertrager zugeführt. Der andere Teil fließt durch den Wärmeübertrager. Über ein Ventil kann so der gewünschte Volumenstrom innerhalb des Wärmeübertragers eingestellt werden. Durch diese Regelung geht kein Wasser aus dem Kreislauf verloren, um den Volumenstrom anzupassen. Zusätzlich wird das durch den Wärmeübertrager erwärmte Wasser mittels Durchmischung bereits vorgekühlt bevor es erneut in das Thermostat eintritt. Die Strömungsrichtung ist für den Kupfer und Edelstahl-Wärmeübertrager im Gegenstromprinzip bzw. für den PTFE-Wärmeübertrager als Kombination aus beidem im Gegen-Gleichstromprinzip ausgebildet.

Um einen Volumenstrom zu erzeugen, der größer ist als der durch den statischen Wasserdruck des IBCs zu erreichende, ist es möglich, das System mit einer Pumpe in zwei Richtungen zu durchspülen. Dazu fördert die Pumpe (grau) das Fluid entweder vom Heizwasser IBC durch den Übertrager in den offenen Behälter oder in umgekehrter Richtung vom offenen Behälter durch den Übertrager in Richtung des IBCs. Für diesen Spülvorgang wird das Heizwasser stets aus dem offenen Behälter durch das System wieder zurück in den offenen Behälter gefördert (grau gestrichelt).

Da der Versuchsstand während der Messung aus zwei Wasserkreisläufen besteht, sind zur Feststellung der abgegebenen und der aufgenommenen Wärmeenergie zwei Temperaturmessungen in beiden Kreisläufen notwendig. Die Kühlwasser- und Heizwassertemperaturen werden jeweils am Ein- und am Austritt des Wärmeübertra-

gers mit zwei Temperaturfühlern gemessen (T1-T8). Die Temperaturfühler sind dazu parallel zur Strömungsrichtung angeordnet.

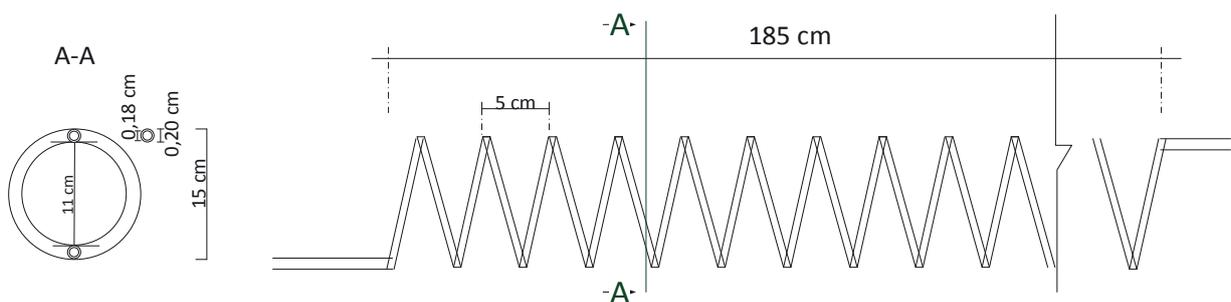
Der Kühlwasservolumenstrom wird konstruktiv bedingt vor dem Eintritt in den Wärmeübertrager gemessen, während der Heizwasservolumenstrom nach dem Austritt aus dem Wärmeübertrager durch ein MID (MID1 und MID2) gemessen wird.

### 3.2 Wärmeübertrager

Der Versuchsstand wurde mit drei Wärmeübertragertypen ausgestattet um den Einfluss des Materials auf das Biofilmwachstum zu erproben. Es wurden hierbei die Materialien Edelstahl, Kupfer und PTFE verwendet. Der Kupfer- und der Edelstahlwärmeübertrager wurden als Rohrwendelwärmeübertrager konstruiert, der PTFE-Wärmeübertrager als Rohrbündelwärmeübertrager.

#### 3.2.1 Rohrwendelwärmeübertrager aus Kupfer und Edelstahl

Der Wärmeübertrager wurde zunächst aus Edelstahl und Kupfer gefertigt, der auf einer Länge von 185 cm spiralförmig in der Mitte des DN 200 Rohrs montiert ist. Er wird von einer Aluminiumleiste fixiert.



**Abbildung 13:** Skizze Wärmeübertrager

In **Abbildung 13** ist eine Skizze des Wärmeübertragers dargestellt. Der Wärmeübertrager hat einen Durchmesser von 2 cm, eine Wandstärke von 1 mm und die Spiralen verlaufen in Abständen von jeweils 5 cm und einer Höhe von 15 cm. Die Gesamtfläche des Wärmeübertragers beträgt 0,86 m<sup>2</sup>. Es wird von einer geschätzten Wärmeübertragerleistung von ca. 400 W/K ausgegangen.



**Abbildung 14:** Verwendete Wärmeübertrager in Kupfer und Edelstahl

In **Abbildung 14** sind die Wärmeübertrager in den Materialien Kupfer und Edelstahl dargestellt. Die Wärmeübertrager wurden speziell für das Forschungsvorhaben angefertigt.

### 3.2.2 Rohrbündelwärmeübertrager aus PTFE

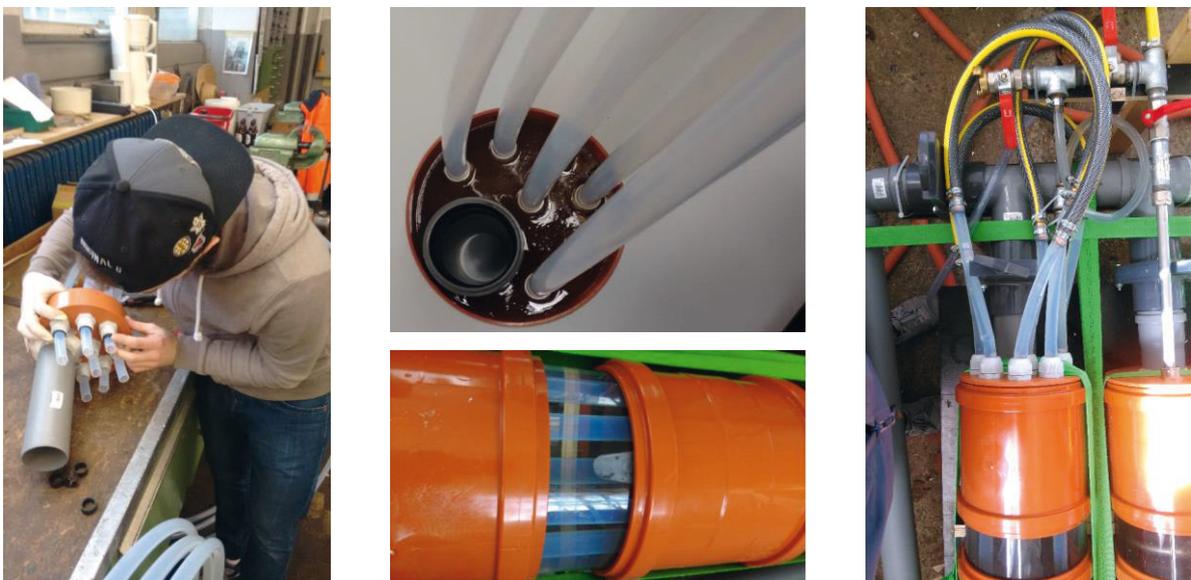
Der dritte Wärmeübertrager wurde aus dem Material Polytetrafluorethen (PTFE) gefertigt. Bekannt unter dem Markennamen „Teflon“ weist es hervorragende chemische und mechanische Eigenschaften auf, denn es ist nicht brennbar, hat eine Einsatztemperatur von  $-200$  bis  $+260^{\circ}\text{C}$ , ist säurebeständig und hat einen nur geringen Reibungskoeffizienten.

Um eine optimale Vergleichbarkeit der Wärmeübertrager zu erhalten, war es anzustreben, den PTFE-Wärmeübertrager, ebenso wie die bereits bestehenden Wärmeübertrager aus Edelstahl und Kupfer, als Rohrwendel-Wärmeübertrager auszubilden. Aufgrund des großen Biegeradius und der Elastizität des Materials ist dies jedoch konstruktiv schwer möglich. Eine Spiralführung mit dem durch das Mantelrohr vorgegebenen Radius ist nicht knickfrei umzusetzen. Somit wird der Wärmeübertrager als Rohrbündel-Wärmeübertrager ausgebildet.

Beim Design des Wärmeübertragers wird festgelegt, dass die Oberflächen aller drei Wärmeübertrager die gleiche Größe haben. Dadurch ergibt sich für den Rohrbündel-Wärmeübertrager eine Anzahl von sieben Durchgängen durch den Mantelstrom. Bei einer ungeraden Anzahl von Durchgängen ist es von Vorteil, wenn der erste innere Durchgang ein Gegenstromdurchgang ist. Ein- und Austritt liegen somit an entge-

gegenseetzten Enden und die Schaltung enthält so mehr Gegenstrom- als Gleichstromdurchgänge (vgl. **Kapitel 2.2.2**).

Bei der Konstruktion wird der PTFE Schlauch in sieben Teilstücke geschnitten und diese wasserdicht durch den Deckel des DN 200 Rohres, welches als Hohlzylinder dient, geführt. Zur Stabilisation der Durchgänge werden die beiden Deckel mit Epoxidharz ausgefüllt. Außerhalb des Wärmeübertragers werden die Enden der Rohrdurchgänge so miteinander verbunden, dass der Wärmeübertrager vom Kühlmedium sieben Mal im Wechsel aus Gegen- und Gleichstrom durchquert wird (1,7-Rohrbündel-Wärmeübertrager vgl. **Abbildung 15**).



**Abbildung 15** : Bau des 1,7-PTFE-Rohrbündel-Wärmeübertragers

Zur Sicherstellung eines möglichst geringen inneren Wärmeübergangswiderstands wird ein turbulenter Strömungszustand innerhalb des Rohrstroms angestrebt.

Ein Rohrwendel-Wärmeübertrager kann bei großen NTU-Werten ab einer Wendelanzahl von 20 als reiner Gegenstromwärmeübertrager berechnet werden<sup>50</sup>, wobei die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz mit den Ein- und Ausgangstemperaturen der Medien berechnet wird. Bei einer gemischten Strömungsführung, wie in einen Rohrbündelapparat mit sieben Durchgängen, existiert keine analytische Lösung. Der

<sup>50</sup> Vgl. Verein Deutscher Ingenieure, 2006, Ca 11.

---

VDI-Wärmeatlas beschreibt vereinfachte Verfahren bis zu einer Anzahl von maximal fünf Durchgängen. Bei einer größeren Anzahl an Durchgängen müssen genauere Rechnungen durchgeführt werden, bei denen für jeden Durchgang ein individueller, flächengemittelter Wärmedurchgangskoeffizient berechnet wird. Das ist notwendig, weil durch die relative Größe der Gleichstrom- und Gegenstromdurchgänge zueinander (NTU-Werte) die Qualität der Strömungsführung beeinflusst wird.<sup>51</sup> Aus diesem Grund wurde zur Berechnung des 1,7-PTFE-Rohrbündel-Wärmeübertragers ein Simulationsmodell aufgebaut und die Ermittlung der mittleren Temperaturdifferenzen erfolgte iterativ.

### 3.3 Thermostat

Zur Temperaturregelung im Wärmeübertrager wurde ein Thermostat (vgl. **Abbildung 16**) der Firma Thermo Scientific (Modell: NESLAB Thermoflex™ 3500) installiert. Diese Komponente des Versuchsaufbaus hat die Aufgabe, eine konstant voreingestellte Vorlauftemperatur, diese entspricht der Temperatur mit welcher das Frischwasser in den Wärmeübertrager einfließen soll, zu garantieren. Die Regulierung der Temperatur erfolgt über einen Temperatursensor (Pt100). Dieser ist in das Thermostat integriert und bestimmt die Ist-Temperatur des Wärmeträgers, um einen Vergleich mit dem gewünschten Sollwert durchzuführen. Entsprechend wird das Medium dann aufgeheizt oder gekühlt. Das Thermostat hat eine Heiz- und Kühlleistung von ca. 3 kW und ermöglicht es die Vorlauftemperatur bis auf  $\pm 0,1$  K konstant zu halten.<sup>52</sup>

---

<sup>51</sup> Vgl. Verein Deutscher Ingenieure, 2006, Cb2.

<sup>52</sup> Für diese und weitere Spezifikationen des Thermostats vgl. Thermo Fisher Scientific GmbH, NESLAB ThermoFlex™ Datasheet

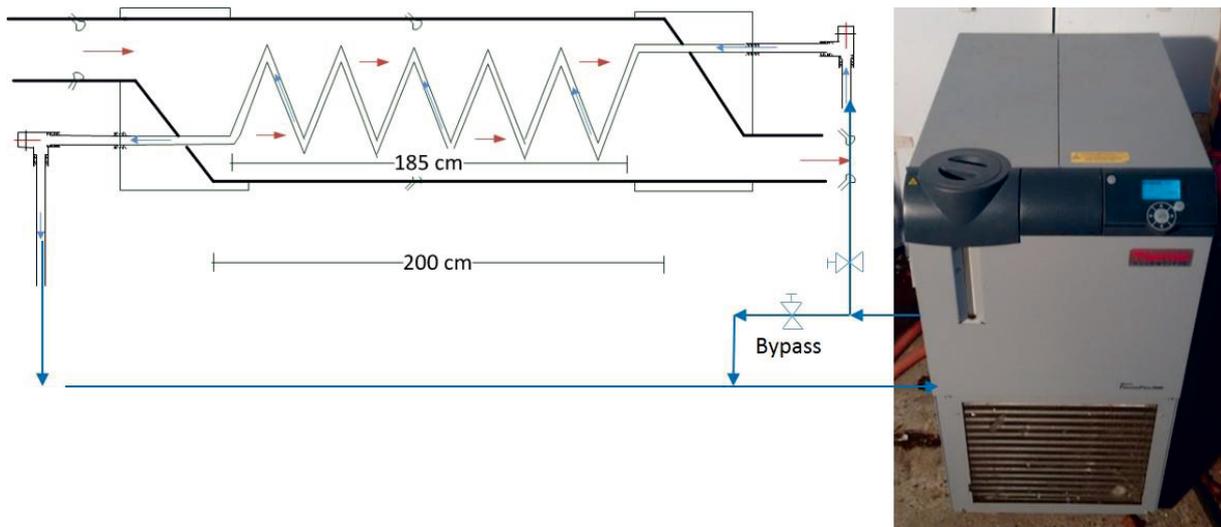


Abbildung 16: Thermostat für die Kaltwasserführung

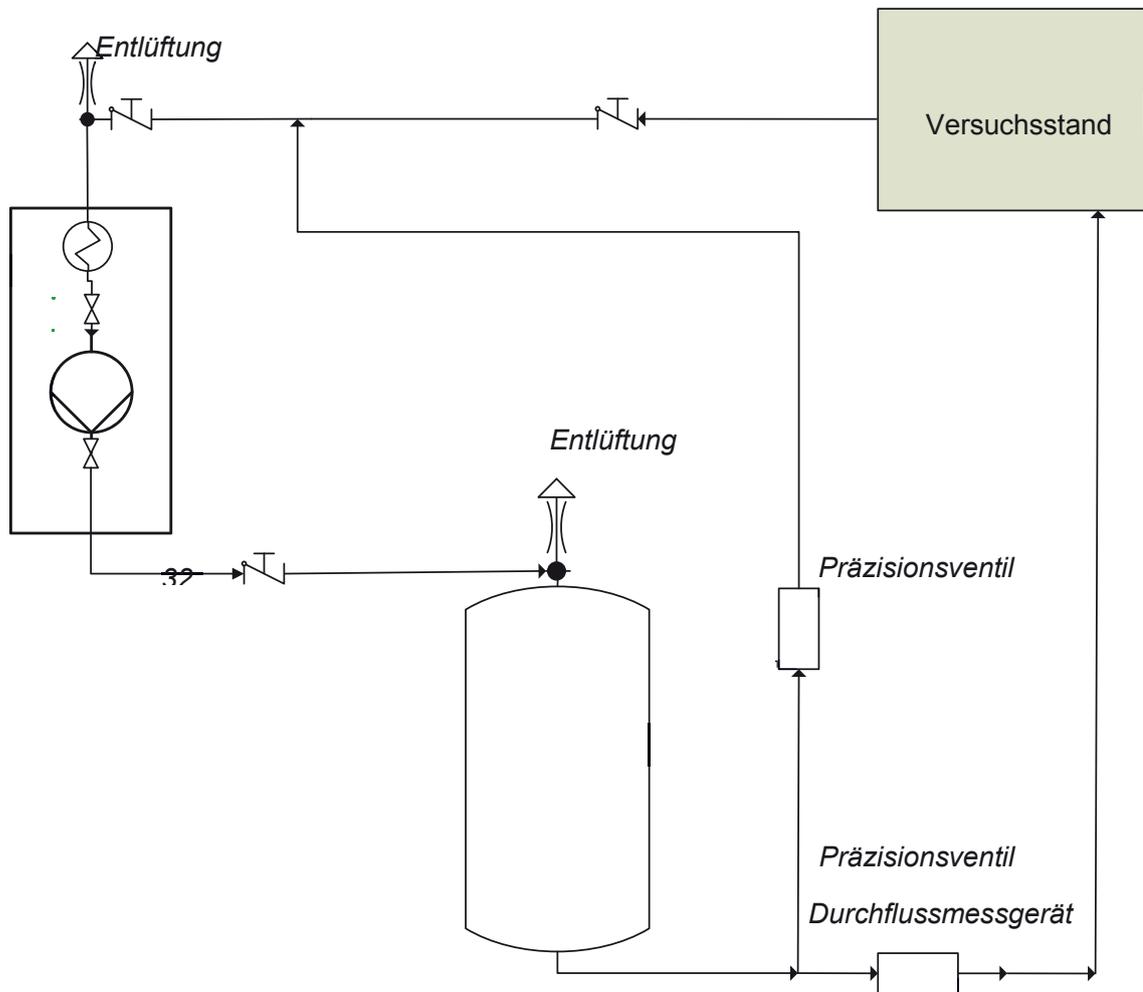


Abbildung 17: Schema der verwendeten Kaltwasserführung

---

Um den Durchfluss des Klarwassers steuerbar zu gestalten, wurde eine Zwischenstation zwischen Thermostat und Versuchsstand konzipiert. Hier fließt das Wasser zunächst in einen kleinen Tank, um das System träger zu gestalten. Von dort aus fließt das Wasser zu einem T-Stück, an dem ein Absperrhahn genutzt wird, um zu steuern, wie groß der Durchfluss des Klarwassers im Versuchsstand sein soll. Hinter diesem Absperrhahn befindet sich ein Durchflussmessgerät der Firma Ehlers GmbH, so dass der Durchfluss eingestellt werden kann. Das Restwasser, das nicht durch den Absperrhahn fließt wird mit dem Rückfluss des erhitzten Klarwassers aus dem Versuchsstand gemischt und geht zurück zum Thermostat. So geht einerseits kein Wasser aus dem Kreislauf verloren und andererseits kann das durch den Thermostat überschüssig abgekühlte Wasser dazu genutzt werden das aufgeheizte Wasser aus dem Versuchsstand bereits vor dem Rückfluss in den Thermostat abzukühlen.

### 3.4 Abwasserspeicher

Als Abwasserspeicher wurde ein IBC Wassertank mit einem Inhalt von 1000 Litern gewählt. Der Abwasserdurchfluss wird mittels hydrostatischem Druck gewährleistet. Der hydrostatische Druck am Ausfluss des Abwasservorratsbehälters ergibt sich aus dem Gewicht der darüber liegenden Wassersäule, dividiert durch deren Querschnittfläche. Um einen konstanten hydrostatischen Druck und somit einen konstanten Durchfluss zu gewährleisten, wurde eine hydraulische Weiche installiert. Mit einer Pumpe wird während der Versuchsdurchführung stetig neues Abwasser in den Vorratsbehälter gepumpt. Überlaufendes Abwasser wird zurück in die Rinne geführt. Dadurch kann durchgängig eine gleichhohe Druckhöhe realisiert werden.<sup>53</sup>

---

<sup>53</sup> IKZ Praxis Fachzeitschrift, Ausgabe 2/2011 S.11



**Abbildung 18 :** IBC mit schematischer Darstellung der Anordnung von Quirl und Heizstab

Zur Erwärmung des Abwassers wurde ein handelsüblicher Kälbermilcherwärmer aus der Landwirtschaft genutzt. Dieser arbeitet dauerhaft mit einer Leistung von 2 KW und hat eine Regelungsmöglichkeit zur groben Einstellung der Wasserzieltemperatur.



**Abbildung 19:** Heizstab mit Bedieneinheit

Der Vorteil dieses Heizstabes liegt darin, dass er auch in verschmutztem Wasser eingesetzt werden kann.

### 3.5 Verwendetes Abwasser

Das Abwasser wird von der Kläranlage Soers in Aachen zu dem Versuchsstand auf dem Gelände der RWTH Aachen befördert. Hierzu wird das Abwasser dem Zustrom der Kläranlage und den Vorklärbecken entnommen. Es handelt sich einerseits um lediglich vorgereinigtes Abwasser aus der Kanalisation und andererseits um vorgeklärtes Abwasser. Bei dem ungeklärten Abwasser wurden lediglich größere Gegenstände wie Äste aus dem Abwasser entnommen. Bei dem vorgeklärten Abwasser sind absetzbare Stoffe wie Fäkalien und Papier zum Großteil entnommen.



**Abbildung 20:** Abwassertransport von der Kläranlage

Das Abwasser wird aus dem Zustrom mittels einer Tauchpumpe der Firma Wilo SE aus dem Abwasserstrom entnommen (vgl. **Abbildung 20**). Die Tauchpumpe verfügt über ein integriertes Schneidwerk. Dadurch können auch Feststoffe zerkleinert und befördert werden. Nach der Entnahme erfolgt der Transport des Abwassers zu dem Versuchsstand, der auf dem Gelände der RWTH Aachen aufgestellt wurde, und das Abwasser wird für die Biofilmwachstumsphase in den Versuchsstand geleitet.

### 3.6 Verwendete Messtechnik

Damit der Wärmeübertragsvorgang zuverlässig beurteilt werden kann, ist eine vollständige Erfassung der messtechnischen Vorgänge in ihren Daten und deren jeweili-

gen Fehlerbeiträgen notwendig. Schon kleine Messfehler können dazu führen, dass der gemessene Wirkungsgrad signifikant vom tatsächlichen Wirkungsgrad abweicht. Problematisch am gegebenenem Versuchsstand ist, dass es einerseits einen Klarwasserstrom gibt und andererseits einen Abwasserstrom. Durch die starke Verunreinigung des Abwassers kann nicht ohne weiteres die gängige Technik zur Durchflussmessung bzw. Durchflusssteuerung verwendet werden. Deshalb musste bereits bei der Konzeption der Anlage eine jeweils eigene Planung für die Messtechnik am Abwasserstrom und am Klarwasserstrom angefertigt werden.

### 3.6.1 Temperatursensoren

Beim hier verwendeten Versuchsstand wurden zur Temperaturmessung Stab-/Kabelfühler verwendet.



**Abbildung 21:** PT1000 Platinwiderstandstemperatursensoren

Die Temperaturen, sowohl bei der Abwassermessung als auch bei der Klarwassermessung, werden mit Platin-Widerstandsthermometern der Klasse B gemessen, die aus einem Messeinsatz in einer korrosionsschützenden Armatur bestehen. Sie können in Temperaturen von  $-50^{\circ}\text{C}$  bis  $180^{\circ}\text{C}$  eingesetzt werden.<sup>54</sup>

Die Funktionsweise von Widerstandstemperturfühlern in Form von Pt1000 Sensoren basiert auf der Abhängigkeit des Widerstands  $R$  [ $\Omega$ ], des elektrischen Leiters Platin, von der Temperatur. Folglich können durch Änderungen des Widerstands, Rückschlüsse auf Temperaturänderungen vorgenommen werden. Jeder Sensor hat eine eigene Widerstandskennlinie. Die Messung verläuft so, dass dem Temperaturfühler ein konstanter Messstrom zugeführt wird, welcher den Sensor durchfließt. Durch Temperaturveränderungen entsteht eine annähernd proportionale Spannungsänderung  $dU$  im Verhältnis zur Widerstandsänderung  $dR$ .<sup>55</sup>

Die Bezeichnung der Sensoren erfolgt über die Charakteristik, dass sie bei einer Temperatur von  $0^{\circ}\text{C}$  einen Nennwiderstand von 1000 Ohm aufweisen ( $R_0=1000\Omega$ ).

<sup>54</sup> Vgl. Fuehler Systeme eNet International (Hrsg.)

<sup>55</sup> Vgl. FuehlerSysteme eNet International (Hrsg.)

Andere übliche Sensoren sind Pt 100 oder Pt 500. Für diese Ausführungen gilt, dass die Grundwerte bzw. Grenzabweichungen jeweils mit dem Faktor n multipliziert werden müssen, mit dem sie vom Nennwiderstand abweichen. Für Pt 100- Sensoren wäre das der Faktor 1/10.<sup>56</sup> Die Widerstandsänderung ist in der DIN EN 60751 festgelegt.<sup>57</sup>

Nach der DIN gilt für Pt 1000 Sensoren im Temperaturbereich von 0°C bis 850°C folgende Beziehung:

$$R_{\vartheta} = R_0(1 + A\vartheta + B\vartheta^2) \quad [\Omega] \quad (6)$$

Mit:

$R_{\vartheta}$ : Widerstand bei der gemessenen Temperatur  $\vartheta$

$R_0$ : Widerstand bei  $\vartheta=0^\circ\text{C}$

$A=3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $B=-5,775 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$

Die Temperaturfühler werden zur Datenspeicherung an eine Smartbox der Firma Ennovatis angeschlossen. Über die Smartbox werden die Messwerte in 5-Sekundenintervallen gespeichert.



**Abbildung 22:** Ennovatis Smartbox Datenlogger

<sup>56</sup> Vgl. Bernstein, H., Messelektronik, 2014, S.233

<sup>57</sup> Vgl. FuehlerSysteme eNet International (Hrsg.)

Aus den Herstellerangaben ist zu entnehmen, dass die Temperatursensoren mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,5$  K messen. Beachtet man, dass die Temperatursensoren des Eingangs- und des Ausgangswertes im schlechtesten Fall um 0,5 K in unterschiedliche Richtungen abweichen, würde ein Messfehler der Temperaturdifferenz von 1,0 K je Strom resultieren. Um eine Messgenauigkeit von 0,1 K zu erreichen, ist es notwendig die Temperaturmessungen eine Messwertkorrekturfunktion zu ermitteln, um so systematische Fehler der Temperaturmessungen zu korrigieren. Hierzu wurden die Temperaturfühler mittels eines Tauchbads der Firma Thermo Scientific und eines geeichten Quecksilberthermometers kalibriert. Zunächst wurde das Tauchbad auf 10°C abgekühlt. Anschließend wurden über 15 Minuten die Temperatursignale der Sensoren aufgezeichnet. Nach dem Messzeitraum wurde die Temperatur um 1 K erhöht und erneut für 15 Minuten gemessen. Dieser Vorgang wurde bis zur Temperatur von 30°C wiederholt. Anschließend wurde die Temperatur wieder in 1 K-Schritten gesenkt und die Temperatursignale wurden für 15 Minuten je Messstufe aufgezeichnet.

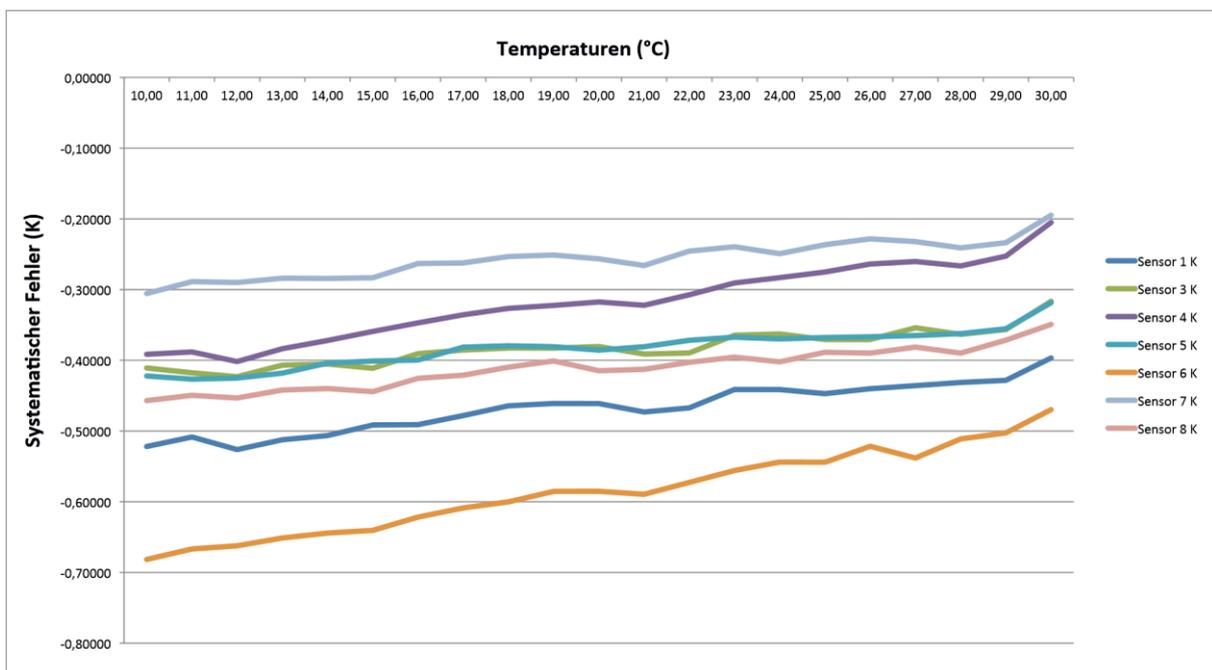


Abbildung 23: Verlauf des systematischen Messfehlers

Bei der anschließenden Auswertung wurde für jede Messstufe der Mittelwert gebildet und mit der tatsächlichen Temperatur, die mit Hilfe der Quecksilberthermometer bestimmt wurde, verglichen. Somit war es möglich den systematischen Messfehler jedes Sensors für die unterschiedlichen Temperaturstufen zu bestimmen. In **Abbildung 23** ist der Verlauf des systematischen Messfehlers exemplarisch für acht der verwendeten Temperatursensoren dargestellt. Es zeigt sich ein linearer Verlauf des

systematischen Messfehlers, so dass die Annahme einer linearen Kalibrierfunktion untermauert wird.

Bei dem hier verwendeten Versuchsstand wurden zur Temperaturmessung Stab-/Kabelfühler verwendet. Der Einbau solcher Fühler in flüssigkeitsführenden Rohrleitungen richtet sich nach der VDI 3512 Blatt 3.

Der Messort ist repräsentativ für die zu messende Temperatur zu wählen. Fehler durch externe Einflüsse, also durch Fremdwärmeeintrag oder Wärmeableitung sind zu vermeiden. Da die hier verwendeten Fühler einen temperaturempfindlichen Bereich und keine Punktform besitzen sind grundsätzlich Tauchhülsen zu verwenden. Dabei ist darauf zu achten, dass ein guter thermischer Kontakt zwischen Sensor und Tauchhülse besteht. Die hier verwendeten Tauchhülsen sind aus Edelstahl gefertigt und es wurde eine Wärmeleitpaste zwischen Sensor und Tauchhülse aufgetragen. Die Fühler müssen auf der gesamten aktiven Messlänge vom Medium angeströmt werden. Das bedeutet, dass die Tauchhülse axial in der Strömungsmittelpunkt anzubringen ist. Zur Erleichterung von Wartungsarbeiten ist es hilfreich, den Einbauort so zu wählen, dass die Sensoren ohne Demontage von Anlagenteilen aus den Tauchhülsen herausgezogen werden können.<sup>58</sup>

Da der Versuchsstand aus zwei Wasserkreisläufen besteht sind zur Feststellung der abgegebenen und der aufgenommenen Wärmeenergie zwei Temperaturmessungen in beiden Kreisläufen notwendig.

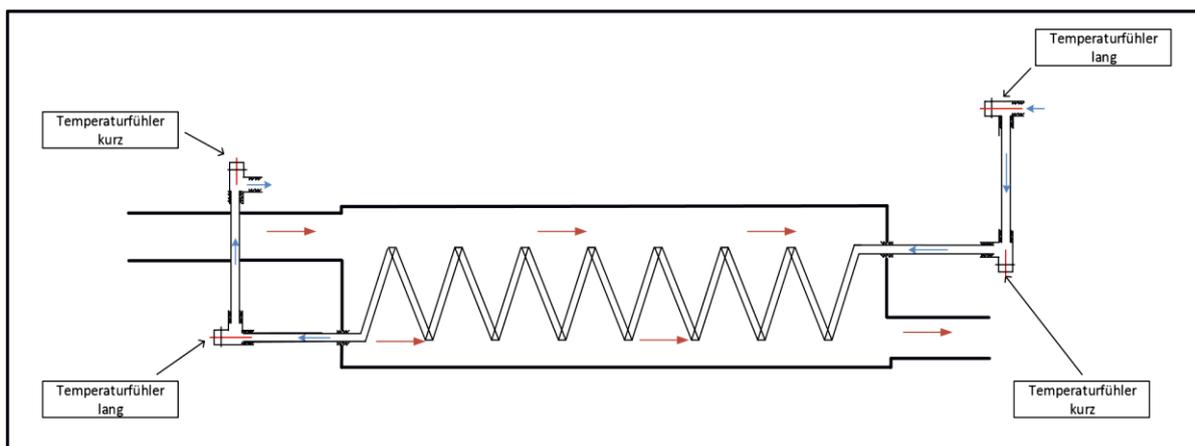
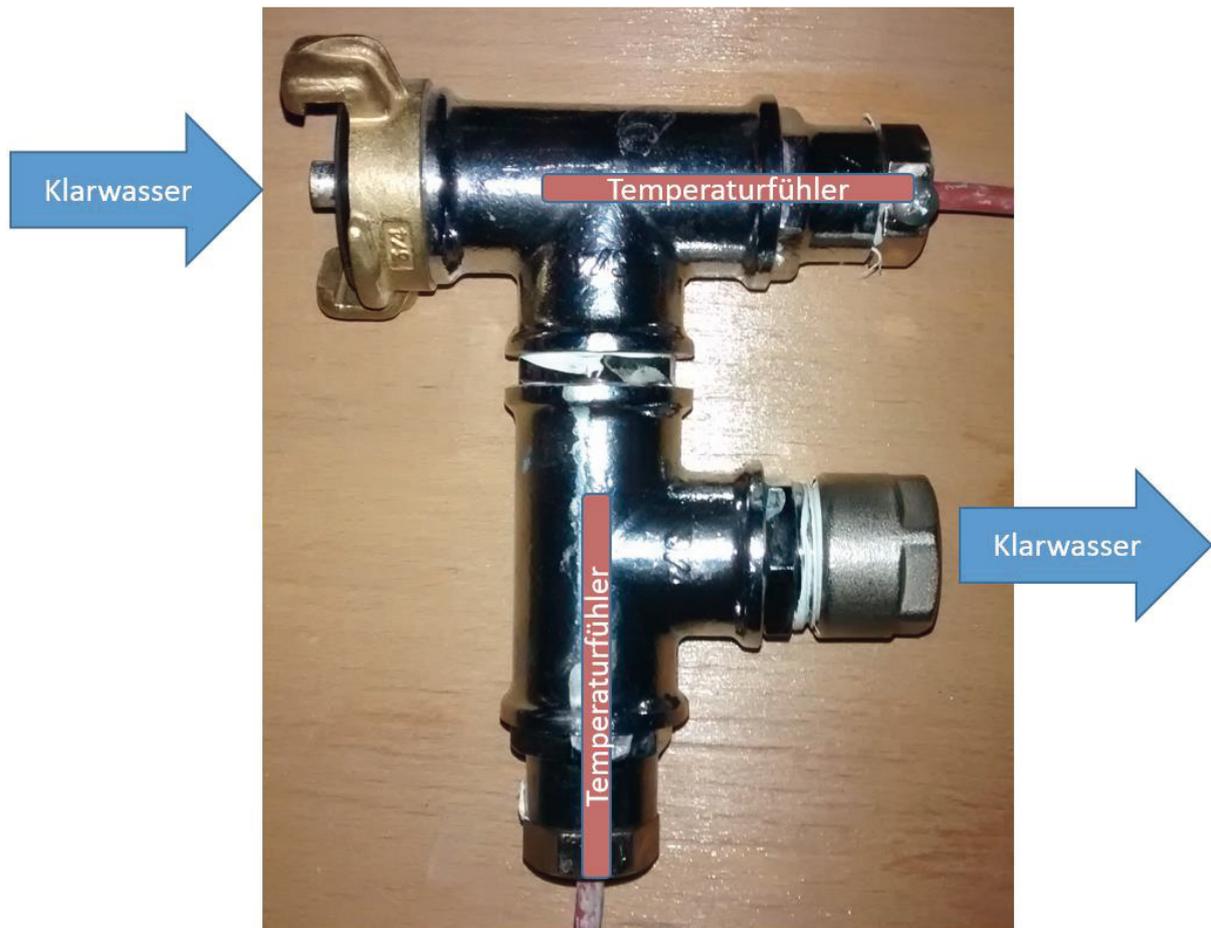


Abbildung 24: Temperaturmessung in dem Klarwasserstrom

<sup>58</sup> Verein deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI 3512 Blatt 3, 2009.

Bei dem Klarwasserkreislauf wurden Tauchhülsen der Länge 50 mm vor und hinter dem Versuchsrohr installiert (Vgl. **Abbildung 25**), um die Eingangs- und Ausgangstemperaturen zu bestimmen. Die Klarwassertemperaturen werden jeweils redundant gemessen. Die Tauchhülsen wurden jeweils in ein T-Stück eingebaut, das als Abzweigung dient. So befindet sich der aktive Bereich der Sensoren stets im Mittelpunkt des Leitungsquerschnitts entgegengesetzt zum Flüssigkeitsstrom.



**Abbildung 25:** Einbringung der Temperaturfühler in den Klarwasserstrom

In dem Abwasserstrom wurden die Tauchhülsen ebenfalls gemäß den Vorgaben der VDI 3512 Blatt 3 eingebaut. Die Tauchhülsen wurden entgegen der Fließrichtung in T-Stücke aus PE-Abwasserrohr eingebracht.



**Abbildung 26:** Einbringung der Temperaturfühler im Abwasserstrom

**Abbildung 26** zeigt den Einbau der Tauchhülsen in den Abwasserstrom. Auch diese Temperaturen werden redundant gemessen. Es wurde eine Tauchhülse mit der Länge 100 mm gewählt, um sicherzustellen, dass der Temperatursensor noch vor der Abzweigung liegt. So wird gewährleistet, dass dieser ausreichend umströmt wird.

### 3.6.2 Volumenstromerfassung

Im verwendeten Versuchsstand wird zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit des Kühlwasserstroms ein magnetisch-induktives Durchflussmessgerät (MID) des Unternehmens H. Hermann Ehlers GmbH mit der Modellbezeichnung M2000 verwendet (**Abbildung 27** links). Die Messgenauigkeit des Durchflussmessgeräts beträgt laut Herstellerangaben  $\pm 0,25$  % v.M. und der Messbereich beträgt 0,03–12 m/s.<sup>59</sup>

<sup>59</sup> Vgl. H. Hermann Ehlers GmbH : MID\_M2000\_Datenblatt.



**Abbildung 27** : MID für die Kühlwassermessung (li.) und die Heizwassermessung (re.)<sup>60</sup>

Für die Messung der Strömungsgeschwindigkeit des Heizwasserstroms kommt ebenfalls ein MID des Unternehmens H. Hermann Ehlers GmbH zum Einsatz. In diesem Fall das Modell Primo (**Abbildung 27** rechts). Dessen angegebener Messbereich erstreckt sich von 0,03 – 12 m/s. Die Messgenauigkeit ist hier laut Hersteller für Volumenströme größer oder gleich 0,5 m/s besser als  $\pm 0,25$  % v.M. und für Volumenströme kleiner 0,5 m/s etwa  $\pm 1,25$  mm/s v. M.<sup>61</sup>

## 4 Vermessung des Versuchsstands

Vor der eigentlichen Versuchsdurchführung wurde der Versuchsstand eingehend vermessen. Hierbei wurden intensive Messungen des sauberen Wärmeübertragers durchgeführt, wodurch auch innere und äußere Wärmeübergangswiderstände in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit errechnet werden konnten.

### 4.1 Konstante Abwassereingangstemperatur

Bei der Erwärmung des Abwassers im Abwasservorratsspeicher bildet sich zwangsläufig eine Temperaturschichtung aus. Um eine gleichmäßige Ausflusstemperatur des Abwassers zu gewährleisten, wurde ein „Quirl“ installiert, der das Abwasser konstant mit einer niedrigen Umlaufgeschwindigkeit umwälzt und so die Temperatur-

<sup>60</sup> Abbildung aus H. Hermann Ehlers GmbH, Datenblätter M2000 und PrimoAdvanced.

<sup>61</sup> Vgl. H. Hermann Ehlers GmbH : MID\_PrimoAdvanced\_Datenblatt.

schichtung zerstört. Im Abwasserspeicher wurden in verschiedenen Höhen vier Temperatursensoren eingebracht, die die Ausprägung der Schichten überwachen.

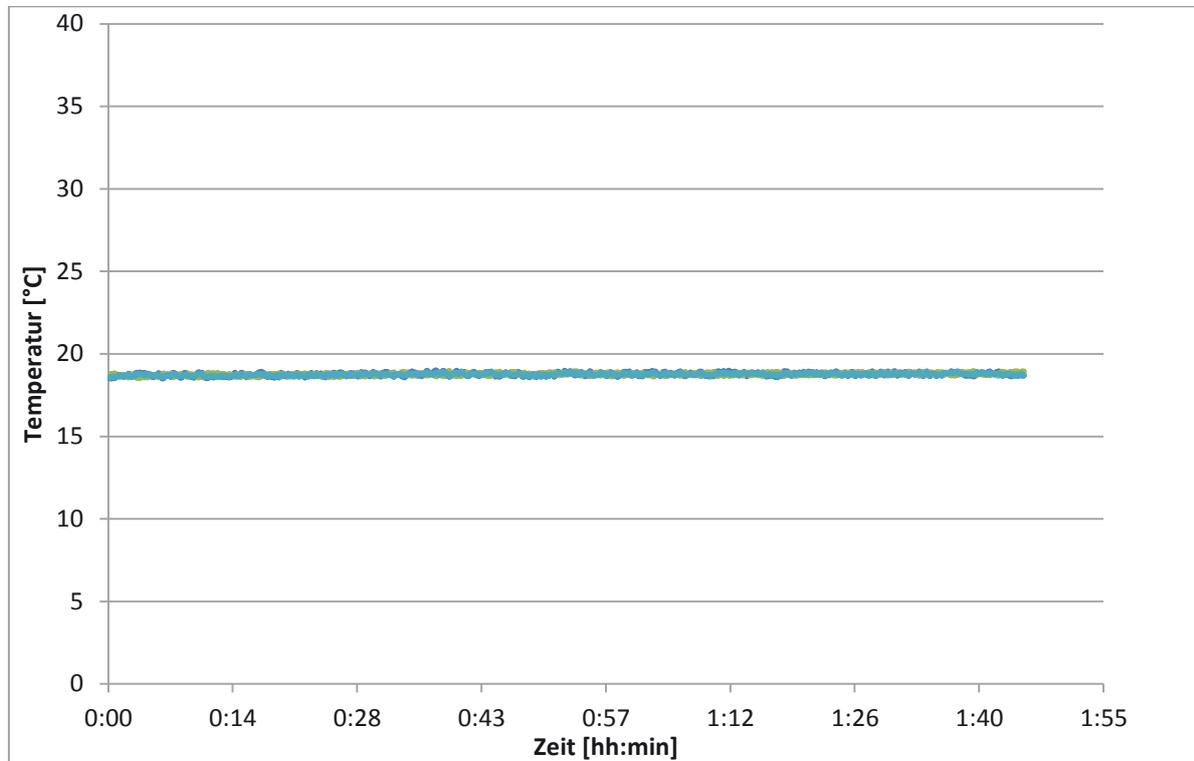


Abbildung 28: Abwassereingangstemperaturen

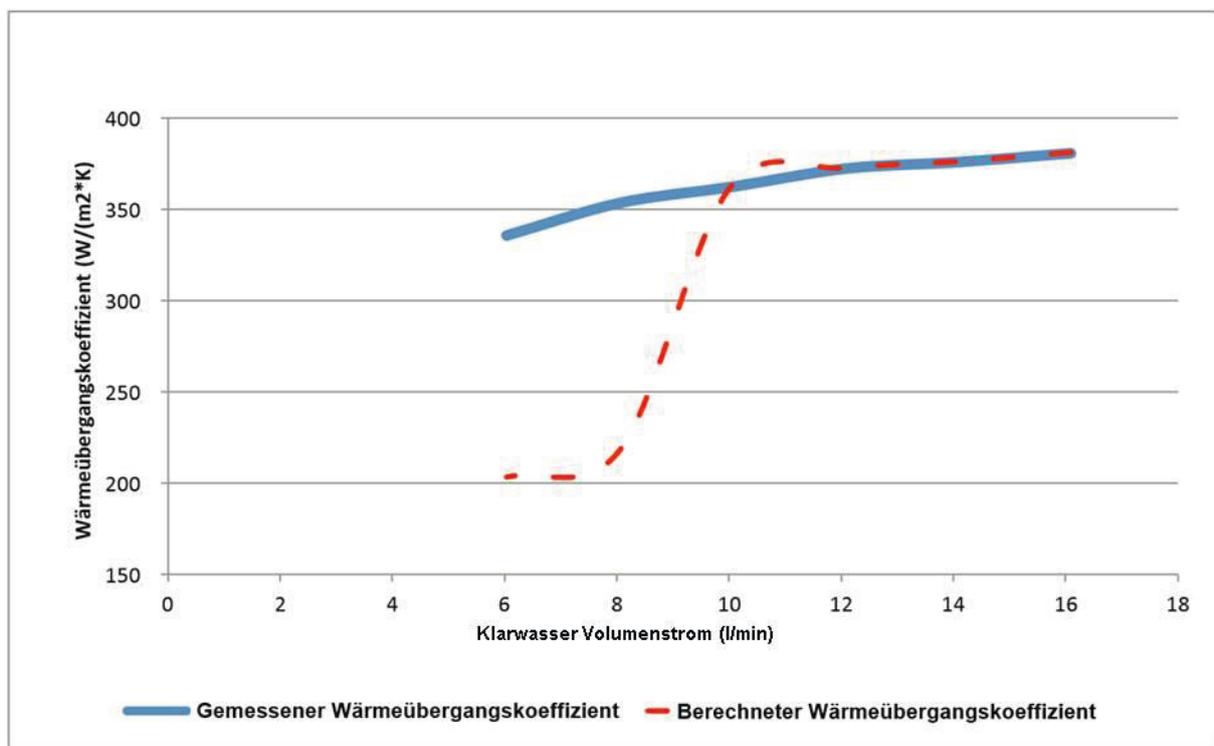
In **Abbildung 28** sind exemplarisch gemessene redundant gemessene Abwassereingangstemperaturen dargestellt. Es zeigt sich, dass eine geringe Temperaturabweichung gewährleistet werden kann. Innerhalb eines Zeitraums von 1:40 h steigt die gemessene Abwassereingangstemperatur um weniger als 0,5 K an.

#### 4.2 Bestimmung des inneren und äußeren Wärmeübergangswiderstands

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben wurde die Berechnung des inneren Wärmeübergangswiderstandes näherungsweise für einen turbulenten Zustand berechnet. Die genaue Berechnung des äußeren Wärmeübergangswiderstandes ist nicht möglich. Daher wurde eine iterative Bestimmung der Wärmeübergangswiderstände vorgenommen. Hierzu wurde zunächst der Klarwasser-Strom konstant gehalten und der Abwasserstrom variiert. Anschließend wurde der Abwasserstrom konstant gehalten und der Klarwasserstrom variiert. Hierzu wurde jeweils der Wärmeübergang aufgezeichnet. Da jeweils nur ein Strom variiert wurde, konnte zugeordnet werden, wie der

Einfluss einer Stömungsveränderung auf den entsprechenden äußeren bzw. inneren Wärmeübergangswiderstand ist.

In **Abbildung 29** sind der gemessene und theoretisch berechnete innere Wärmeübergangskoeffizient für den Wärmeübertrager dargestellt. Es zeigt sich, dass bei einer turbulenten Strömung der berechnete und der gemessene Wärmeübergangswiderstand sehr gut übereinstimmen. Im Übergangsbereich zwischen laminar und turbulent, sowie im laminaren Bereich, weicht der gemessene Wert deutlich von dem theoretisch errechneten Wert ab. Dies ist nicht untypisch, da in der Regel nur bei turbulente Strömungszuständen von einer genauen Berechenbarkeit der Übergangswiderstände ausgegangen werden kann. Daher werden weitergehende Versuche mit einer Mindestfließgeschwindigkeit von 12 l/min durchgeführt.



**Abbildung 29:** Gemessener und Berechneter Wärmeübergangskoeffizient

**Abbildung 30** zeigt den Verlauf des gemessenen äußeren Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit des Abwasserdurchflusses. Es zeigt sich, dass der der Übergangskoeffizient mit steigendem Abwasservolumenstrom zunimmt.

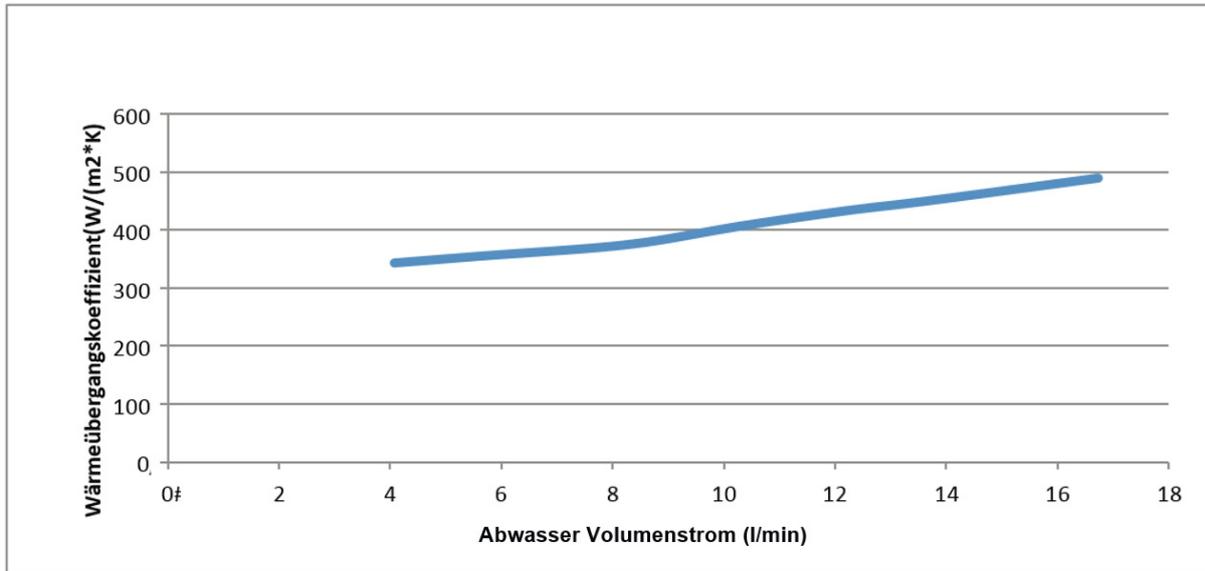


Abbildung 30: Äußerer Wärmeübergangswiderstand

Nach Kenntnis der Wärmeübergangswiderstände kann auf einen sich bildenden Biofilm zurückgerechnet werden.

### 4.3 Stationärer Zustand innerhalb des Wärmeübertragers

Um ein reproduzierbares Messergebnis zu gewährleisten, ist es notwendig, einen annähernd stationären Zustand innerhalb des Versuchstandes zu erreichen. Zur Ermittlung der Zeit bis zu Erreichung eines stationären Zustandes, wurde das Abwasserrohr, in dem sich der Wärmeübertrager befindet, mit 9 innenliegenden Temperatursensoren ausgestattet. In **Abbildung 31** ist die Anordnung der Temperatursensoren dargestellt.

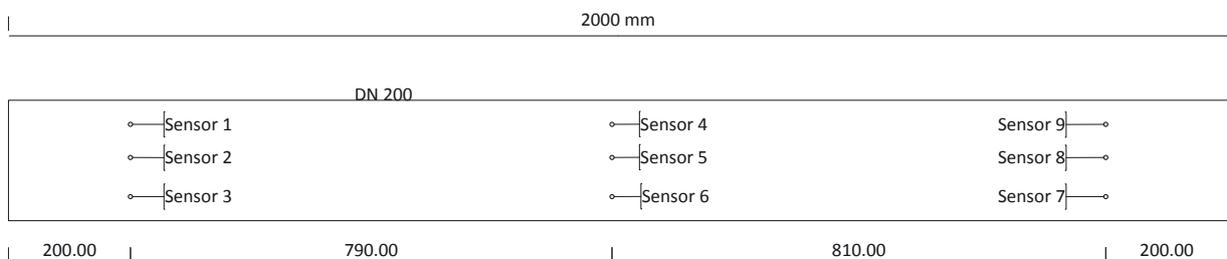
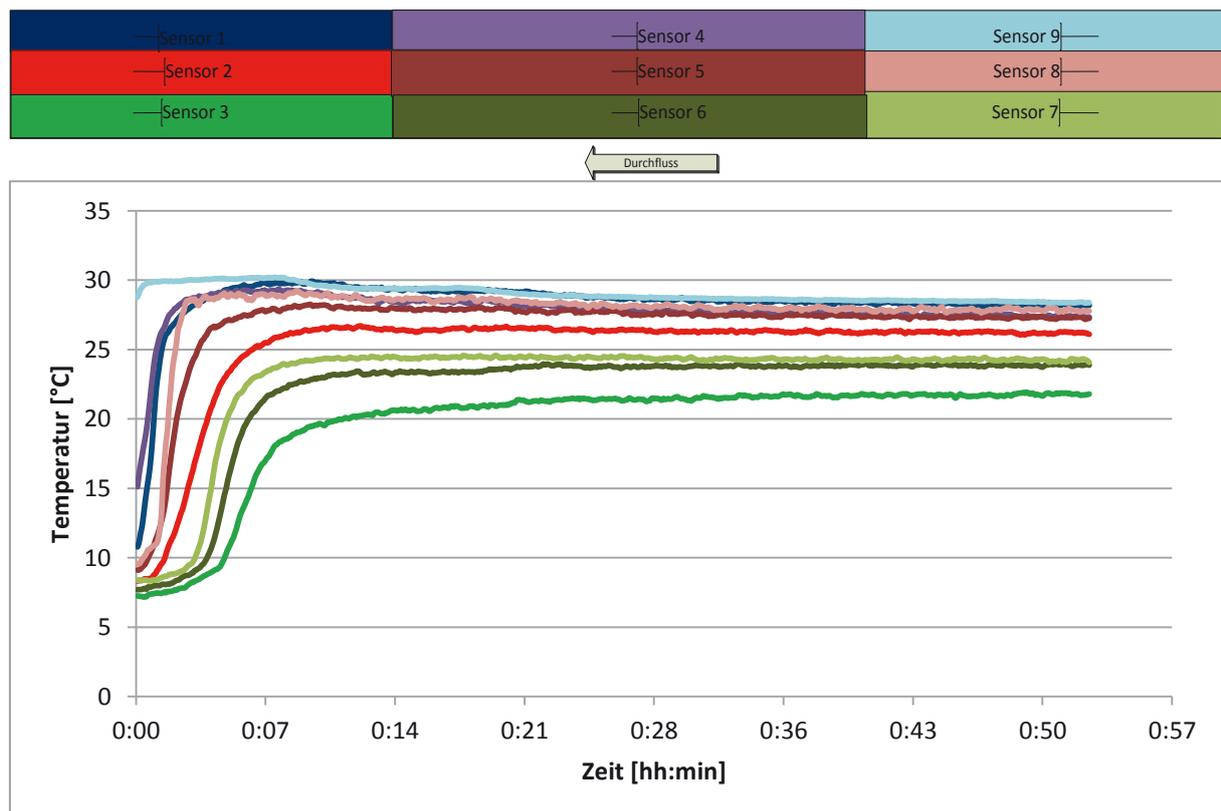


Abbildung 31: Anordnung der Temperatursensoren über die Längsseite des Rohres

Die ersten Fühler sind 20 cm vom Beginn des Abwasserreaktors entfernt eingebracht. Fühler 7 ist in einer Höhe von 4 cm, Fühler 8 in einer Höhe von 10,5 cm und Fühler 9 in einer Höhe von 16 cm positioniert. In der Mitte des Rohrs, 110 cm vom Anfang entfernt befinden sich, von unten nach oben, in den gleichen Abständen die Sensoren 6,5 und 4. 20 cm vor Ende des Rohrs befinden sich die Sensoren 3,2 und 1 (wieder von unten nach oben in den gleichen Abständen). Die Fühler ragen jeweils bis in die Mitte des Abwasserreaktors, das heißt ca. 10 cm, hinein.

Anschließend wurden verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Durchflüssen getestet.

In **Abbildung 32** sind die Temperaturverläufe der einzelnen Sensoren dargestellt. In diesem Szenario wurde der Wärmeübertrager mit 6 °C kaltem Klarwasser durchströmt. Das Abwasser fließt mit einem Durchfluss von 8 Litern pro Minute mit einer Temperatur von ca. 31 °C in das Rohr hinein.



**Abbildung 32:** Temperaturverläufe des Abwassers bei einem Durchfluss von 8 l/min

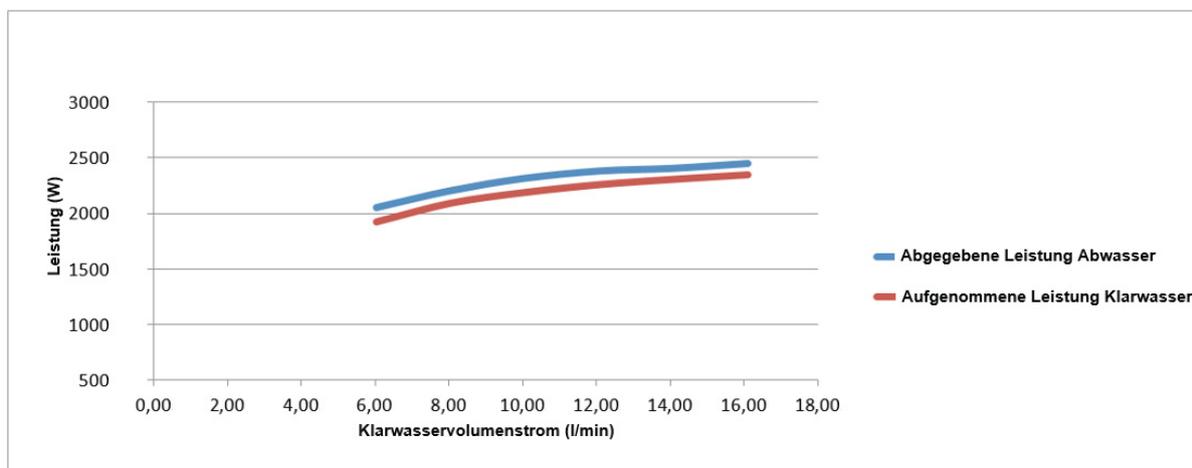
Es zeigt sich, dass die Temperaturen mit Einleiten des Abwassers sprunghaft ansteigen. Nach ca. 10 Minuten sind alle Temperaturen angestiegen. Ein annähernd stationärer Zustand stellt sich nach 30 Minuten ein. Daraus folgert, dass bei einer Mes-

sung mit einem Abwasserdurchfluss von 8 l/min erst nach 30 Minuten eine annähernd stationäre, reproduzierbare Messung erfolgen kann.

#### 4.4 Energiebilanz

Aus der Messung des Abwasservolumenstroms und der Temperaturveränderung lässt sich die Leistung, mit der dem Abwasser Energie entzogen wird, errechnen. Aus dem Volumenstrom des Klarwassers und der Temperaturerhöhung lässt sich die aufgenommene Leistung errechnen. Diese Energien sind theoretisch identisch.

In **Abbildung 33** ist die gemessene abgegebene Leistung des Abwassers sowie die gemessene aufgenommene Leistung des Klarwassers dargestellt. Wie ersichtlich ist, sind die Werte auch für verschiedene Volumenströme nicht identisch. Die abgegebene Leistung liegt stets über der aufgenommenen Leistung. Die Differenz liegt bei ca. 40 W.



**Abbildung 33:** Leistungsbilanz für verschiedenen Durchflüsse

Bei einer Gesamtleistung von 2300 W entspricht dies einem vertretbaren Messfehler von unter 2 Prozent. Im weiteren Forschungsverlauf wird mit der gemittelten aufgenommenen und abgegebenen Leistung gerechnet.

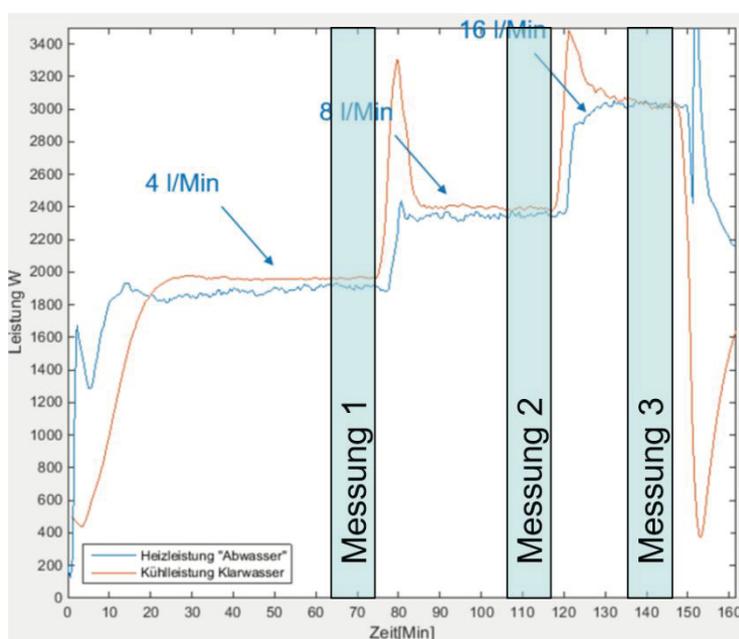
## 4.5 Versuchsdurchführung

Vorbereitend für die Messung wird das Abwasser dann vollständig in die Kanalisation abgelassen. Um grobe Schwebstoffe von der Rohrsohle abzutransportieren, wird vor dem erneuten Befüllen eine kurze Schwallspülung der Rohrsohle durchgeführt und ebenfalls in die Kanalisation abgeleitet. Die Oberflächen des innenliegenden Wärmeübertragers bleiben von der Schwallspülung unberührt, um eine ungewollte Vorreinigung zu vermeiden.

Nach dieser Vorreinigung werden die drei Wärmeübertrager mit einem Volumenstrom von 6 l/min mit auf 21°C vorgeheiztem Heizwasser befüllt. Nach Verdrängung der Luft wird das Gesamtsystem umgewälzt. Der Heizkreislauf ersetzt während der Messung das warme Abwasser. Gleichzeitig wird die Zirkulation des Kühlkreislaufes gestartet. Dabei fließt im Gegenstromverfahren Kühlwasser durch die Wendeln bzw. im Gleichstrom-Gegenstrom durch die Rohre und von dort aus in ein Thermostat, welches die Eingangstemperatur des Kühlwassers von 10 °C in den Wärmeübertrager reguliert.

Die Volumenströme im Heizwasser- und Kühlwasserkreislauf können unabhängig voneinander variiert werden. Mit dem vorliegenden Versuchsaufbau können nicht mehrere Wärmeübertrager parallel vermessen werden. Somit müssen während der Vermessung eines Wärmeübertragers jeweils die beiden anderen über die Schieber verschlossen werden. Während der Kühlwasservolumenstrom über den gesamten Messzeitraum konstant 16 l/min beträgt, wird der Heizwasservolumenstrom während der Vermessung eines Wärmeübertragers zwischen 4, 8 und 16 l/min variiert. Dadurch ergeben sich drei Messzyklen, die jeweils für die drei Wärmeübertrager wiederholt werden. Die Volumenströme werden über den gesamten Messzyklus von den MIDs gemessen. Ebenso werden die Vor- und Rücklauftemperaturen der beiden Kreisläufe jeweils redundant gemessen und in einer Smartbox geloggt. Vor dem Beginn eines Messzyklus wird das Gesamtsystem solange umgewälzt, bis sich ein quasi-stationärer Zustand eingestellt hat. Dazu wurden in vorangegangenen Versuchen anhand von unterschiedlichen Szenarien die Temperaturschwankungen innerhalb des Wärmeübertragers untersucht, um die Dauer zu ermitteln, nach der sich bei einem konstanten Wasserzufluss ein quasi stationärer Strömungs- und Temperaturzustand einstellt. Es zeigte sich, dass die Temperaturen durch eine Änderung des Durchflusses zunächst sprunghaft ansteigen und sich dann im weiteren Verlauf abhängig vom Durchfluss ein stationärer Zustand einstellt. Während des Messvorgangs werden mehrmals die Durchflüsse variiert werden. Nach Umstellung des Durchflusses soll die Messung erst beginnen, wenn sich ein quasi stationärer Zustand eingestellt hat, um ein reproduzierbares Messergebnis zu gewährleisten. Durch die Vorversuche sind die Zeitspannen bis zur Erreichung eines quasi stationären Zustands

für die einzelnen Durchflüsse bekannt und es wird anschließend jeweils eine zehnmünütige Messung durchgeführt. Während dieser wird mit jedem Fühler im Sekundentakt eine Temperatur gemessen und der Mittelwert in 30 Sekunden-Abständen gespeichert. Aus diesen über die 10 Minuten gemessenen 20 Mittelwerten wird nach der Messung erneut der Mittelwert gebildet, um genau eine gemittelte Temperatur über den Zeitraum pro Temperaturfühler zu erhalten. Ist die Messung für einen Durchfluss abgeschlossen, so wird der nächste Durchfluss eingestellt und unter Berücksichtigung der Einschwingzeit eine neue Messung gestartet. Dieser Ablauf wird für die drei Wärmeübertrager identisch wiederholt. Auf diese Weise wird jeder Wärmeübertrager mit drei unterschiedlichen Durchflüssen vermessen.



**Abbildung 34** : Zeitlicher Verlauf der Messung und Erreichung des quasi stationären Zustands für einen Wärmeübertrager aus Edelstahl<sup>62</sup>

Die Leistung des Kühl- und des Heizwasserstroms des Edelstahl-Wärmeübertragers über dem Messzeitraum von 150 Minuten ist in **Abbildung 34** dargestellt. Zu Beginn der ersten Einschwingzeit steigen die Leistungen zunächst an und pendeln sich auf den ersten quasi-stationären Zustand für einen Durchfluss von 4 l/min ein (Minute 0 bis 64). Danach beginnt Messung 1, welche zehn Minuten dauert. Im Anschluss wird der Durchfluss auf 8 l/min umgestellt. Zunächst steigen die Leistungen wieder stark an, bevor sich der quasi-stationäre Zustand erneut einstellt. Nach 25 Minuten Einschwingzeit beginnt die zehnmünütige Messung 2. Zuletzt wird der Durchfluss auf 16

l/min umgestellt und nach einer zehnminütigen Einschwingzeit beginnt Messung 3 mit der gleichen Dauer. Der gesamte Messzyklus des Edelstahl-Wärmeübertragers erstreckt sich über ca. 150 Minuten. Danach werden die Schieber der Wärmeübertrager umgestellt und die Messungen für den Kupfer- bzw. PTFE-Wärmeübertrager wiederholt.

Die drei Messungen liefern jeweils über einen Zeitraum von zehn Minuten Werte der Eingangs- und Ausgangstemperaturen des Wärmeübertragers, sowie die dazugehörigen Volumenströme. Aus diesen aufgezeichneten Werten wird bei der Auswertung ein Mittelwert gebildet.

Um den Einfluss eines sich bildenden Biofilms auf die Messergebnisse zu ermitteln, müssen die Wärmeübergangswiderstände bestimmt werden. Die Berechnung des inneren Wärmeübergangswiderstandes kann näherungsweise für einen turbulenten Zustand berechnet werden. Die genaue Berechnung des äußeren Wärmeübergangswiderstandes ist nicht möglich. Daher wurde eine iterative Bestimmung der Wärmeübergangswiderstände vorgenommen. Hierzu wurde zunächst der Kühlwasserstrom konstant gehalten und der Heizwasserstrom variiert. Anschließend wurde der Heizwasserstrom konstant gehalten und der Kühlwasserstrom variiert. Dabei wurden jeweils die Temperaturen gemessen und so der Wärmeübergang aufgezeichnet. Da jeweils nur ein Strom variiert wurde, konnte zugeordnet werden, wie der Einfluss einer Strömungsveränderung auf den entsprechenden äußeren bzw.- inneren Wärmeübergangswiderstand ist.

## 5 Versuchsbeobachtung und Auswertung der Ergebnisse

Vor der eigentlichen Bestimmung des Biofilms wurde der Wärmeübertrager im sauberen Zustand intensiv vermessen. Dadurch konnten auch die inneren und äußeren Wärmeübergangswiderstände sowie der Wärmedurchlasswiderstand durch die Rohrwand näherungsweise bestimmt werden. In **Tabelle 2** sind die Wärmedurchlass- und Wärmeübergangswiderstände in Abhängigkeit des äußeren Volumenstroms dargestellt. Es zeigt sich, dass mit einer Erhöhung des Abwasserstroms eine Verringerung des äußeren Wärmeübergangswiderstands einhergeht.

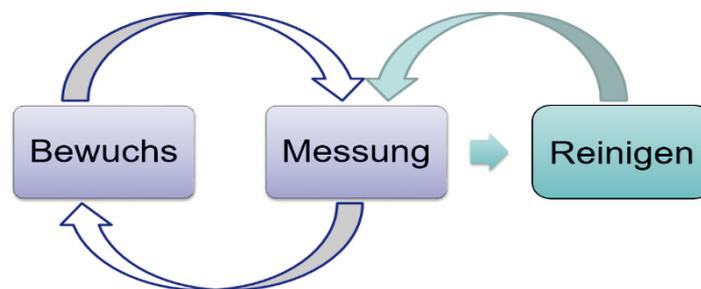
Der innere Klarwasserstrom wurde bei den Messungen konstant bei einem Volumenstrom von 16 l/Min gehalten. Bei diesem Durchfluss ist der Stömungszustand innerhalb des Wärmeübertragers turbulent. Der äußere Abwasservolumenstrom ist aufgrund des großen äußeren Rohrdurchmessers stets laminar. Daher resultiert, dass der äußere Wärmeübergangswiderstand deutlich höher als der innere Wärmeübergangswiderstand ist.

Insgesamt verfügt der Kupfer-Wärmeübertrager über den höchsten Wärmedurchgang. Dieser liegt in Abhängigkeit des Abwasser-Volumenstroms zwischen 358 und 488 W/(m<sup>2</sup> K). Der Wärmedurchgang durch den Edelstahlwärmeübertrager ist leicht geringer und liegt in Abhängigkeit des Abwasservolumenstroms zwischen 350 und 473 W/(m<sup>2</sup> K). Der PTFE-Wärmeübertrager verfügt werkstoffbedingt über eine deutlich schlechtere Wärmeleitfähigkeit des Materials. Aufgrund von Messungenauigkeiten konnten daher bei dem PTFE-Wärmeübertrager die Wärmeübergangswiderstände in Abhängigkeit des Volumenstroms nicht bestimmt werden. Es wird daher nur ein gesamter Wärmedurchgang von 114 W/(m<sup>2</sup> K) für einen inneren und äußeren Volumenstrom von 16 Litern pro Minute angegeben.

**Tabelle 2:** Wärmeübergangswiderstände der Wärmeübertrager bei einem Kühl-Klarwasservolumenstrom von 16 l/min

		Edelstahl			Kupfer			PTFE		
Volumenstrom Abwasser	$\left[\frac{l}{\text{min}}\right]$	4	8	16	4	8	16	4	8	16
Fließgeschwindigkeit Abwasser	$\left[\frac{m}{s} \cdot 10^{-3}\right]$	2,1	4,2	8,5	2,1	4,2	8,5	2,1	4,2	8,5
Innerer Wärmeübergangswiderstand	$\left[\frac{m^2 K}{W} \cdot 10^{-4}\right]$	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	-	-	-
Wärmedurchlasswiderstand Rohrwand	$\left[\frac{m^2 K}{W} \cdot 10^{-6}\right]$	0,78	0,78	0,78	4,85	4,85	4,85	-	-	-
Äußerer Wärmeübergangswiderstand	$\left[\frac{m^2 K}{W} \cdot 10^{-3}\right]$	2,6	2,5	1,9	2,6	2,5	1,9	-	-	-
Wärmedurchgang des Wärmeübertragers	$\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$	350	370	473	358	379	488	-	-	114

Über den gesamten Versuchszeitraum betrachtet wird ein Kreislauf aus Phasen des Bewuchses und Messungen vollzogen. Zu einem definierten Zeitpunkt wird dann entschieden, den Wärmeübertrager zu reinigen. Die Auswirkungen der Abreinigung werden anschließend erneut gemessen. (vgl. **Abbildung 35**).



**Abbildung 35:** Prinzip der Versuchsdurchführung<sup>63</sup>

Das Abwasser wurde in der Regel montags, mittwochs und freitags getauscht. Die Klarwasservermessung fand in der Regel montags und freitags statt.

<sup>63</sup> Eigene Darstellung.

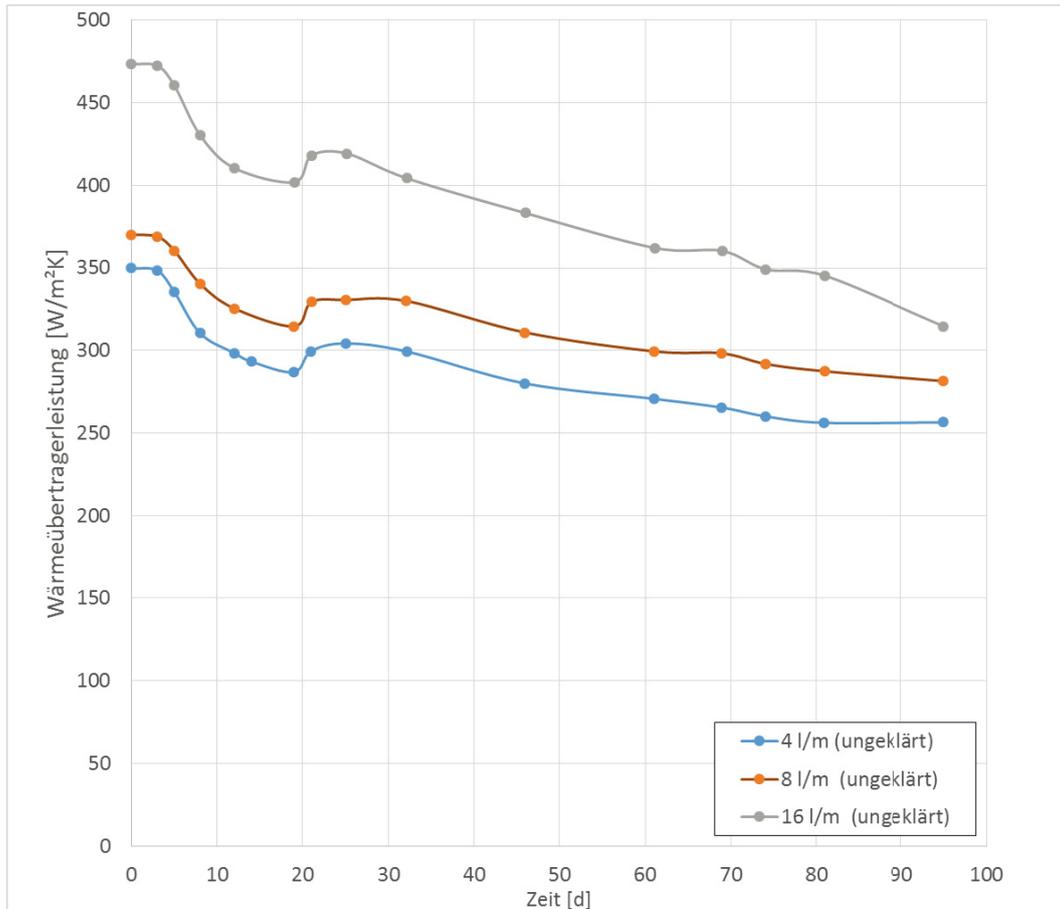
## 5.1 Wärmeübertrager aus Edelstahl

**Abbildung 36** zeigt einen Ausschnitt des Edelstahl-Wärmeübertragers und die sich darauf ablagernde Verschmutzung im Laufe der Zeit. Der Biofilm beginnt an einigen Stellen zu wachsen, breitet sich von diesen aus. Teilweise werden einige Stellen des Biofilms schon bei sehr kleinen Strömungsgeschwindigkeiten weggespült.



**Abbildung 36:** Verschmutzung des Edelstahlwärmeübertragers

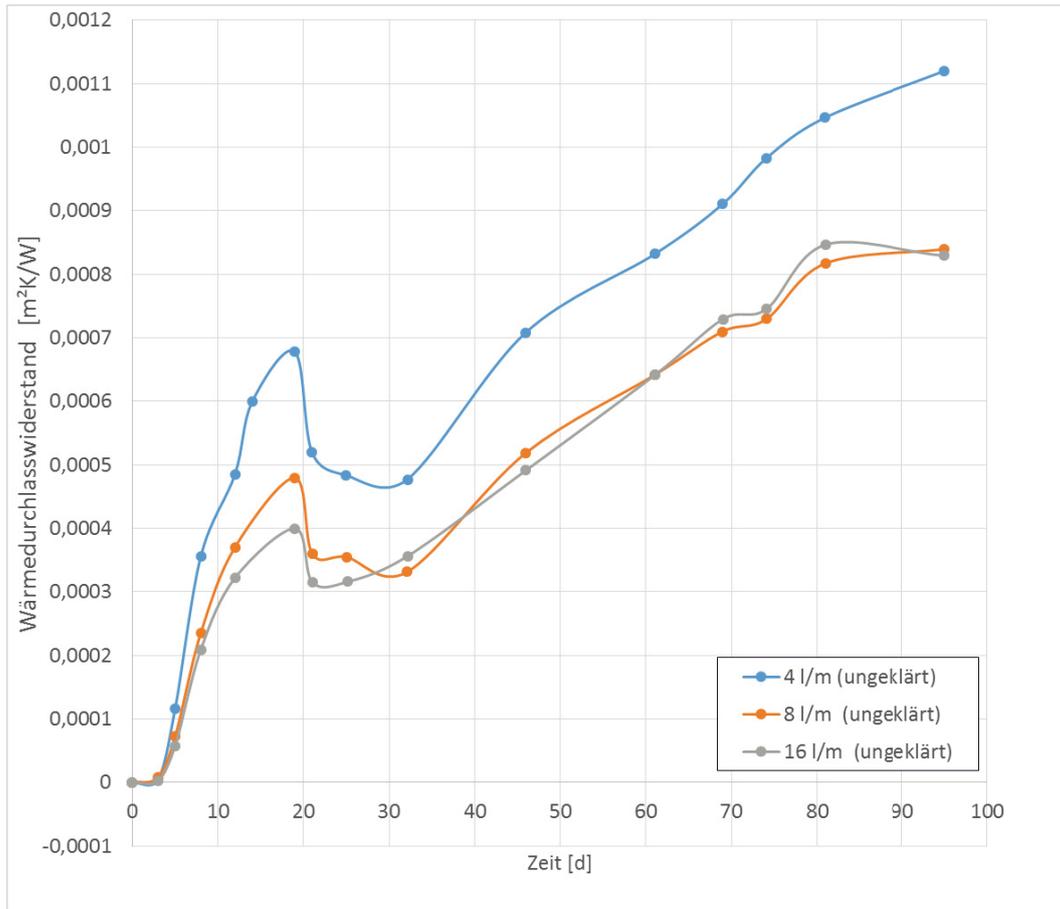
Es zeigt sich, dass der Wärmeübertrager im Zeitverlauf immer weiter bewachsen wird. Die Versuche wurden mit ungeklärtem und vorgeklärtem Abwasser durchgeführt. Die Minderung der Wärmeübertragerleistung ist in Abhängigkeit des Abwasservolumenstroms in **Abbildung 37** dargestellt. Zu Beginn der Versuchsreihe beträgt die Wärmeübertragerleistung zwischen 350 und 473 W/(m<sup>2</sup> K). Zunächst sinkt die Wärmeübertragerleistung und steigt nach 20 Tagen leicht an. Es wird vermutet, dass dieser leichte Anstieg an einer durch den Biofilm erhöhten und ungleichmäßigeren wärmeübertragenden Fläche liegt. Anschließend sinkt die Wärmeübertragerleistung stetig ab. Nach 95 Tagen verringert sich der Wärmedurchgang bei einem Abwasservolumenstrom bei 16 l/Min von 473 W/(m<sup>2</sup> K) auf 314 W/(m<sup>2</sup> K). Damit wurde die Wärmeübertragerleistung um 34 Prozent vermindert.



**Abbildung 37:** Wärmeübertragerleistung des Edelstahlwärmeübertragers bei ungeklärtem Abwasser

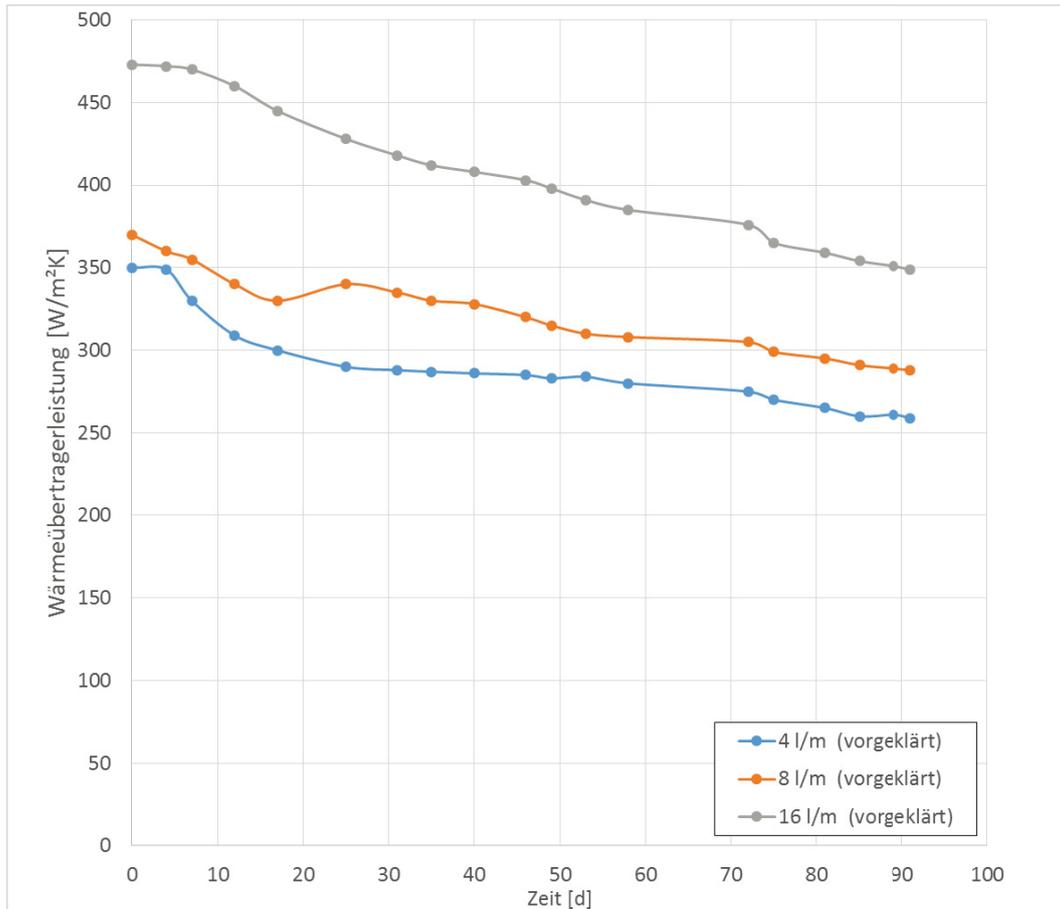
Ausgehend von der Wärmeübertragungsminderung wurde nun der Wärmedurchlasswiderstand des Biofilms berechnet. Dieser ist für den Edelstahlwärmeübertrager bei ungeklärtem Abwasser in **Abbildung 38** dargestellt.

Der Wärmedurchlasswiderstand des Biofilms ist grundsätzlich unabhängig von der Abwasserfließgeschwindigkeit. Da der Biofilm allerdings auch die äußeren Wärmeübergangskoeffizienten an das Fluid beeinflusst, ergeben sich unterschiedliche Wärmedurchgänge bei unterschiedlichen Durchflussgeschwindigkeiten des Abwassers. Eine gesonderte Betrachtung der Veränderung des Wärmeübergangs- und des Wärmedurchgangswiderstandes ist mit dem Versuchsstand nicht möglich.



**Abbildung 38:** Wärmedurchlasswiderstand des Biofilms auf dem Edelstahlwärmeübertrager bei ungeklärtem Abwasser

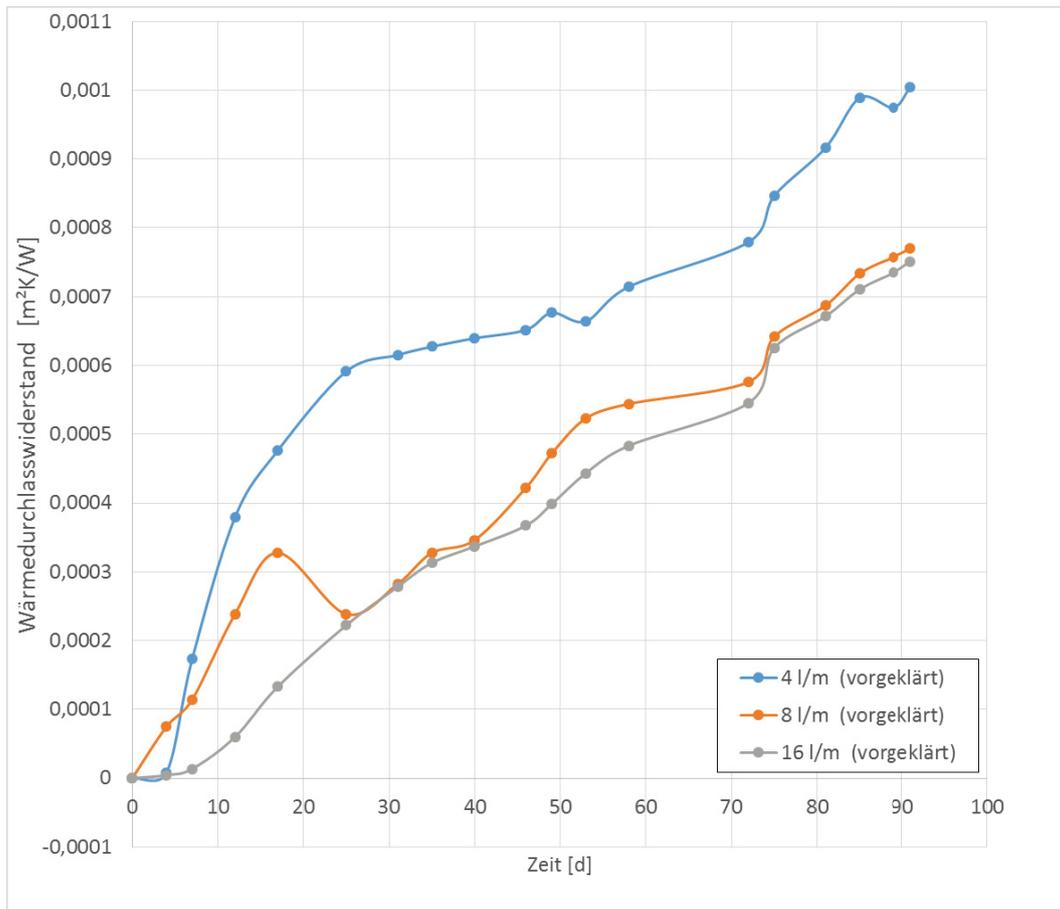
Wie zu erkennen ist, ist der berechnete Wärmedurchlasswiderstand von Biofilm für 4 l/min deutlich höher als für 16 l/min. Dies liegt darin begründet, dass die Verringerung des äußeren Wärmeübergangswiderstands durch den ungleichmäßigen Bewuchs mit Biofilm sich auf höhere Volumenströme deutlich stärker auswirkt, als auf kleinere Volumenströme. In einem Zeitraum von 95 Tagen erreicht der Wärmedurchlasswiderstand bei 16 l/min einen Wert von 0,00083 ( $\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$ ) und einen Wert von 0,0011 ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ) für einen Volumenstrom von 4 l/min.



**Abbildung 39:** Wärmeübertragerleistung des Edelstahlwärmeübertragers bei vorgeklärtem Abwasser

Neben dem ungeklärten Abwasser wurde weiterhin vorgeklärtes Abwasser für die Versuchsdurchführung verwendet. In **Abbildung 39** ist die Wärmeübertragerleistung des Edelstahlwärmeübertragers bei vorgeklärtem Abwasser dargestellt. Es zeigt sich ein ähnlicher Verlauf wie bei ungeklärtem Abwasser. Insgesamt ist die Abnahme des Wärmeübergangs leicht verringert. Nach 91 Tagen verringert sich der Wärmedurchgang bei einem Abwasservolumenstrom bei 16 l/Min von 473 W/(m<sup>2</sup> K) auf 349 W/(m<sup>2</sup> K). Damit wurde die Wärmeübertragerleistung um 26 Prozent vermindert.

Die sich daraus ergebenden Wärmedurchlasswiderstände für Biofilm auf dem Edelstahlwärmeübertrager bei vorgeklärtem Abwasser sind in **Abbildung 40** dargestellt. In einem Zeitraum von 91 Tagen erreicht der Wärmedurchlasswiderstand bei 16 l/min einen Wert von 0,00075 (m<sup>2</sup> K)/W und einen Wert von 0,001 (m<sup>2</sup>K)/W für einen Volumenstrom von 4 l/min.



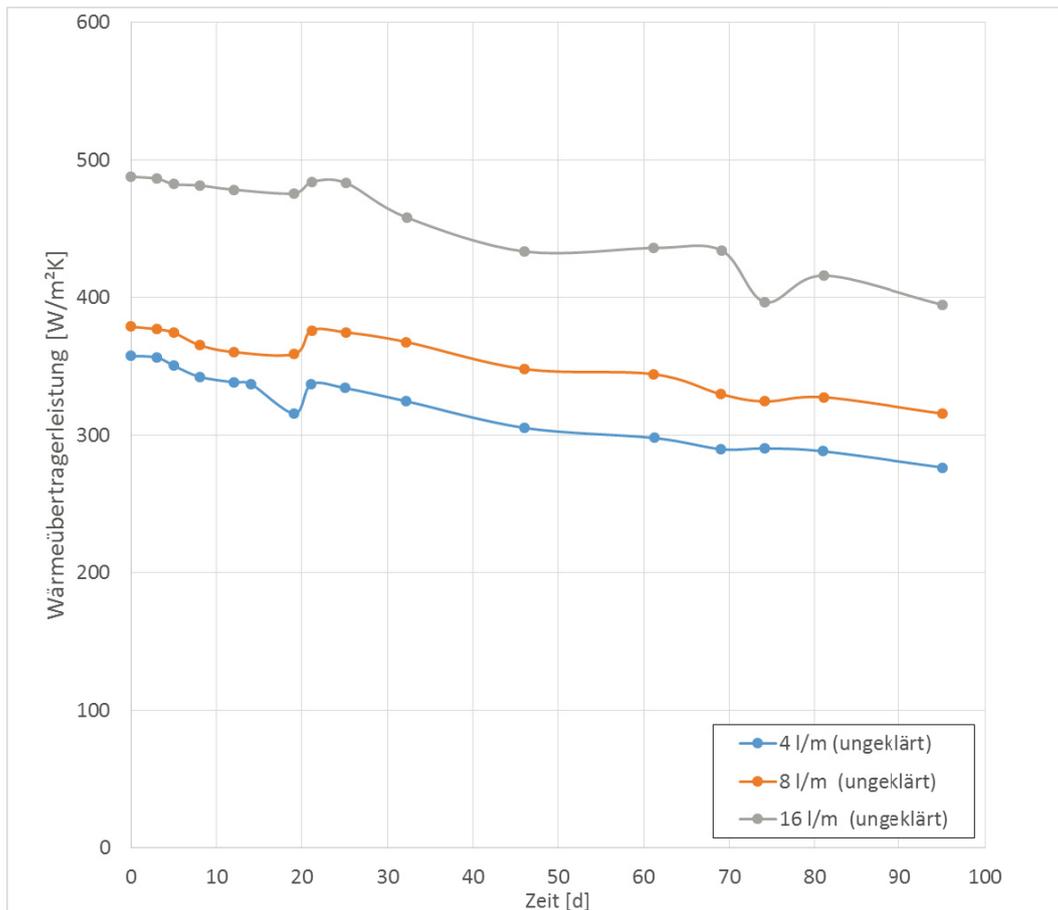
**Abbildung 40:** Wärmedurchlasswiderstand des Biofilms auf dem Edelstahlwärmeübertrager bei vorgeklärtem Abwasser

## 5.2 Wärmeübertrager aus Kupfer

Analog zum Wärmeübertrager aus Edelstahl wurde der Wärmeübertrager aus Kupfer mit un- und vorgeklärtem Abwasser vermessen. Der Kupferwärmeübertrager verfärbt sich in beiden Szenarien nach wenigen Tagen komplett schwarz. Daher ist das Biofilmwachstum auf dem Kupferwärmeübertrager im Zeitverlauf auf Fotos nicht darstellbar.

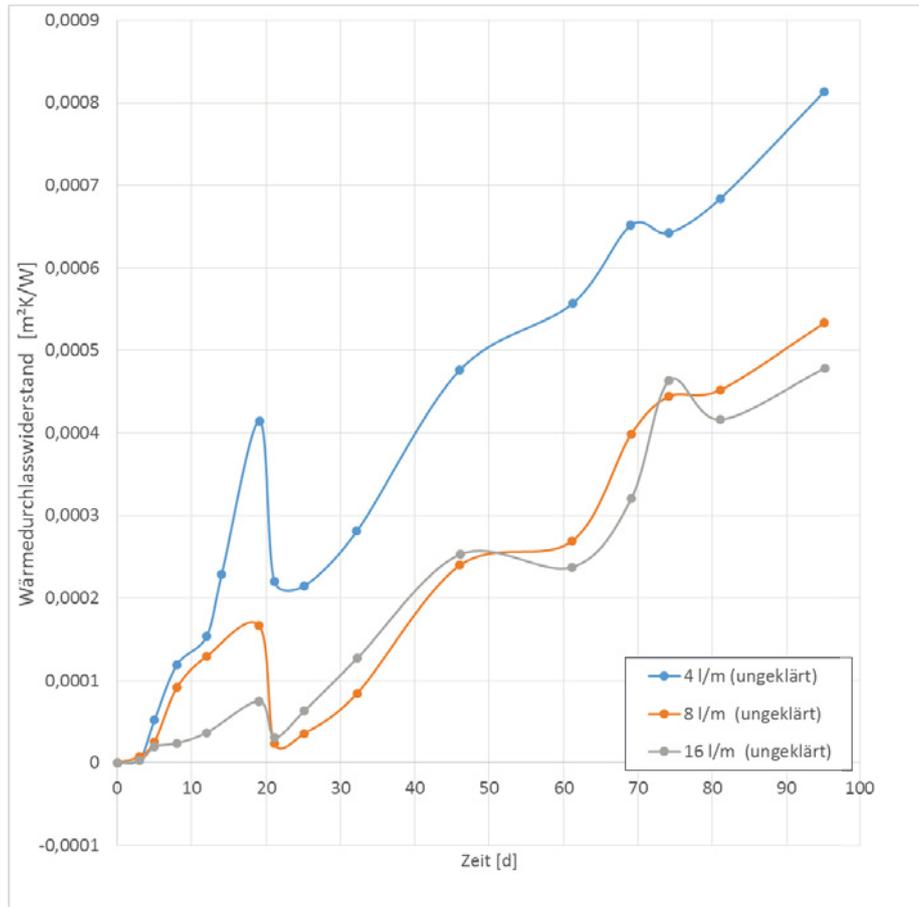
Wie bei dem Edelstahlwärmeübertrager zeigt sich auch bei dem Kupferwärmeübertrager eine Abnahme der Wärmeübertragerleistung. In **Abbildung 41** ist die Wärmeübertragerleistung des Kupferwärmeübertragers im Zeitverlauf dargestellt. Es findet eine Reduktion der Wärmeübertragerleistung, die leicht geringer ist als beim Edelstahlwärmeübertrager, statt. Nach etwa 18 Tagen steigt die Leistung des Wärmeübertragers wieder bis zur Ausgangswärmeübertragerleistung an. Auch hier ist davon auszugehen, dass sich durch den Biofilm die Wärmeübertrageroberfläche vergrößert

und weiterhin durch die Unebenheiten eine Reduktion des äußeren Wärmeübergangswiderstands stattfindet. Nach 95 Tagen hat sich der Wärmedurchgang bei einem Durchfluss von 16 l/min auf von 488 W/(m<sup>2</sup> K) auf 394 W/(m<sup>2</sup> K) verringert und entspricht einer Reduktion von 19 Prozent.



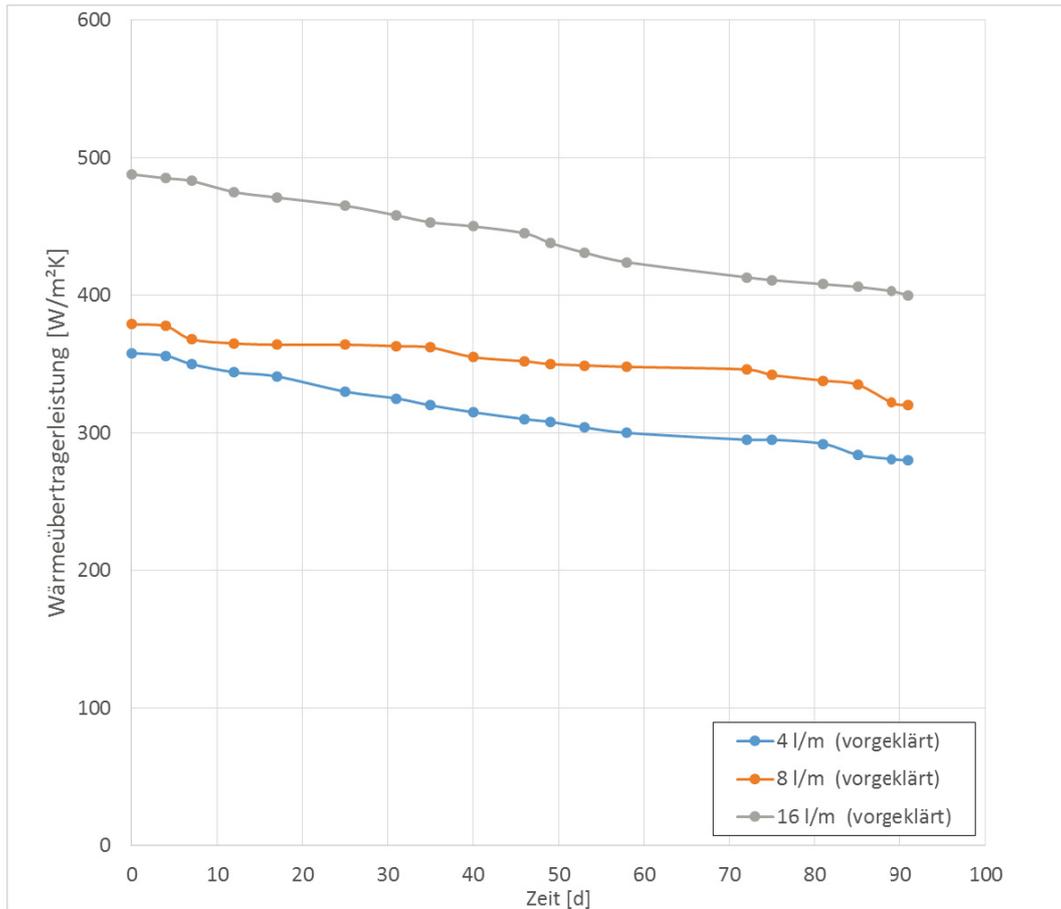
**Abbildung 41:** Wärmeübertragerleistung des Kupferwärmeübertragers bei ungeklärtem Abwasser

Der bei ungeklärtem Abwasser sich einstellende Wärmedurchlasswiderstand durch Biofilm ist in **Abbildung 42** dargestellt. In einem Zeitraum von 95 Tagen erreicht der Wärmedurchlasswiderstand bei 16 l/min einen Wert von 0,00048 (m<sup>2</sup> K)/W und einen Wert von 0,00081 (m<sup>2</sup>K)/W für einen Volumenstrom von 4 l/min.



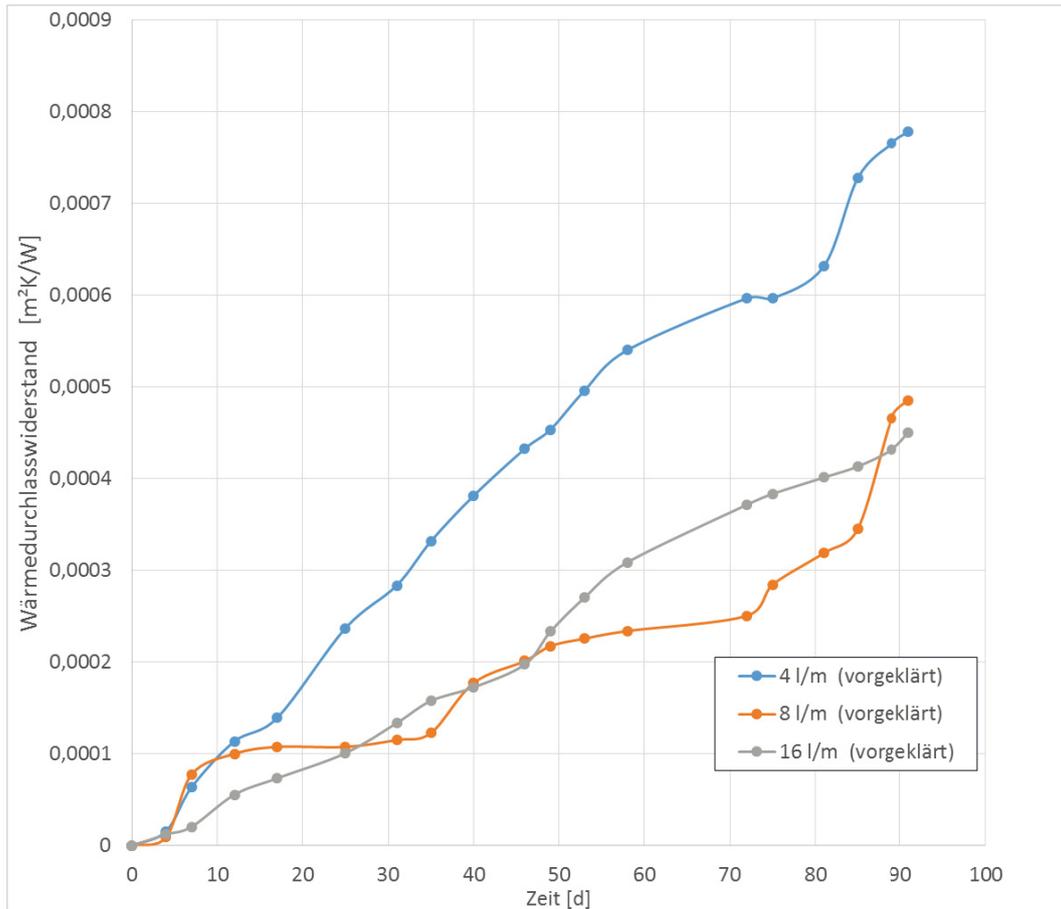
**Abbildung 42:** Wärmedurchlasswiderstand des Biofilms auf dem Kupferwärmeübertrager bei ungeklärtem Abwasser

Wiederrum wurden der gleiche Wärmeübertrager aus Kupfer ebenfalls mit vorgeklärtem Abwasser untersucht. Die Reduktion der Wärmeübertragerleistung ist im zeitlichen Verlauf in **Abbildung 43** dargestellt. Nach 91 Tagen reduziert sich die Wärmeübertragerleistung bei einem Durchfluss von 16 l/min von 488 W/(m² K) auf 400 W/(m² K) und entspricht einer Reduktion von 18 Prozent.



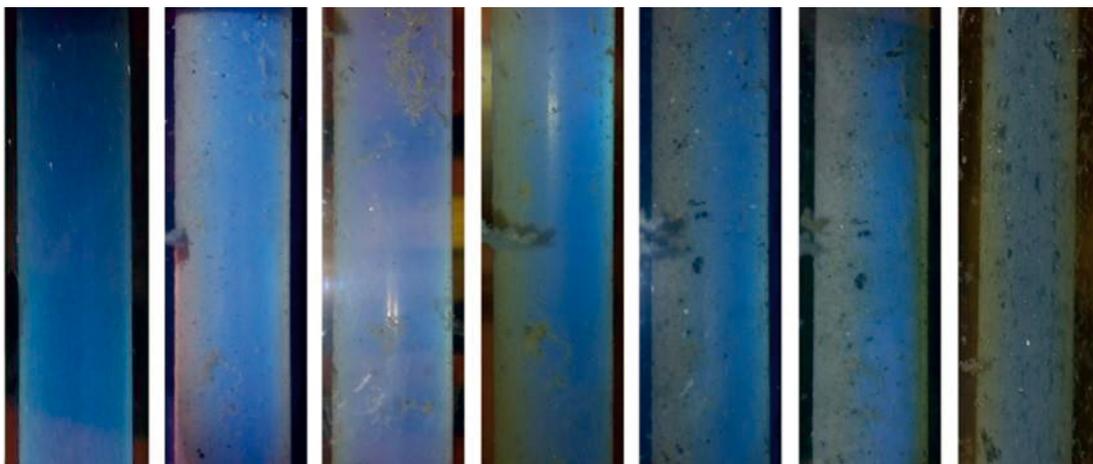
**Abbildung 43:** Wärmeübertragerleistung des Kupferwärmeübertragers bei vorgeklärtem Abwasser

Der sich daraus bei ungeklärtem Abwasser einstellende Wärmedurchlasswiderstand durch Biofilm ist in **Abbildung 44** dargestellt. In einem Zeitraum von 91 Tagen erreicht der Wärmedurchlasswiderstand bei 16 l/min einen Wert von  $0,00045 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$  und einen Wert von  $0,00078 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$  für einen Volumenstrom von 4 l/min.



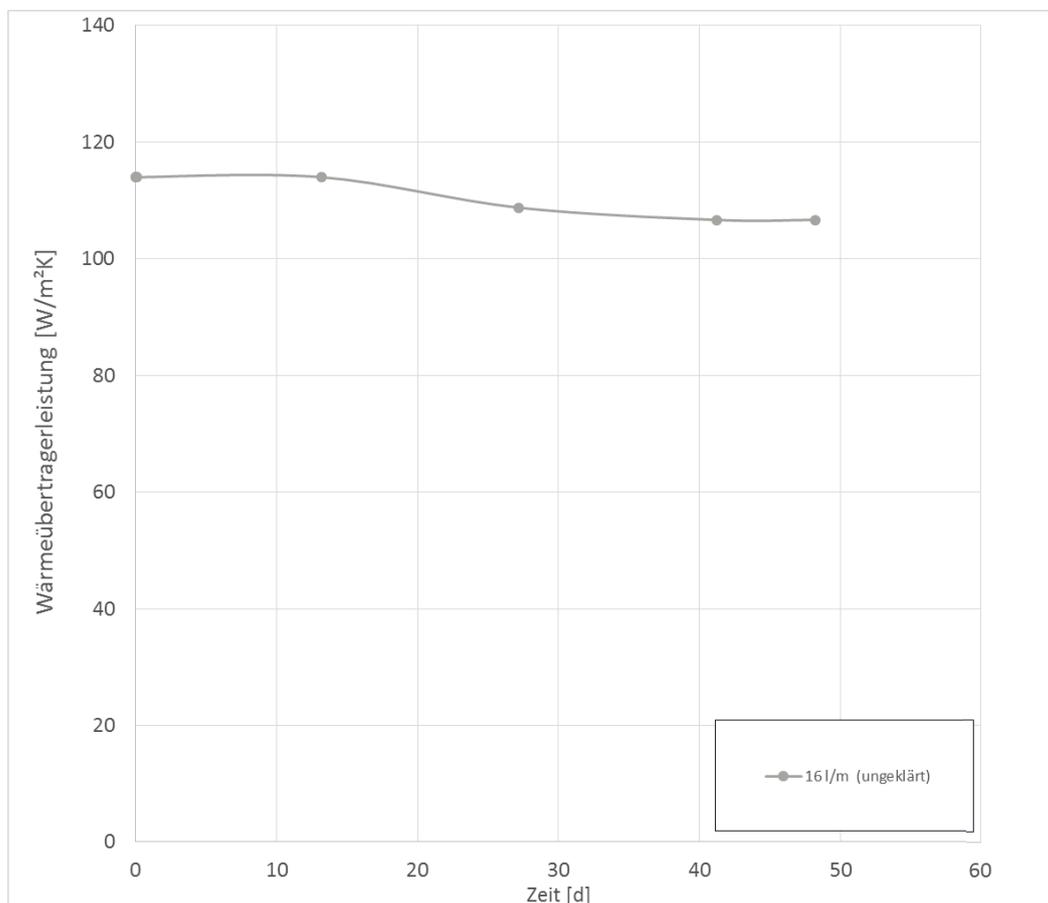
**Abbildung 44:** Wärmedurchlasswiderstand des Biofilms auf dem Kupferwärmeübertrager bei vorgeklärtem Abwasser

### 5.3 Wärmeübertrager aus PTFE



**Abbildung 45 :** Zeitlicher Verlauf des Biofilmwachstums auf dem PTFE-Wärmeübertrager

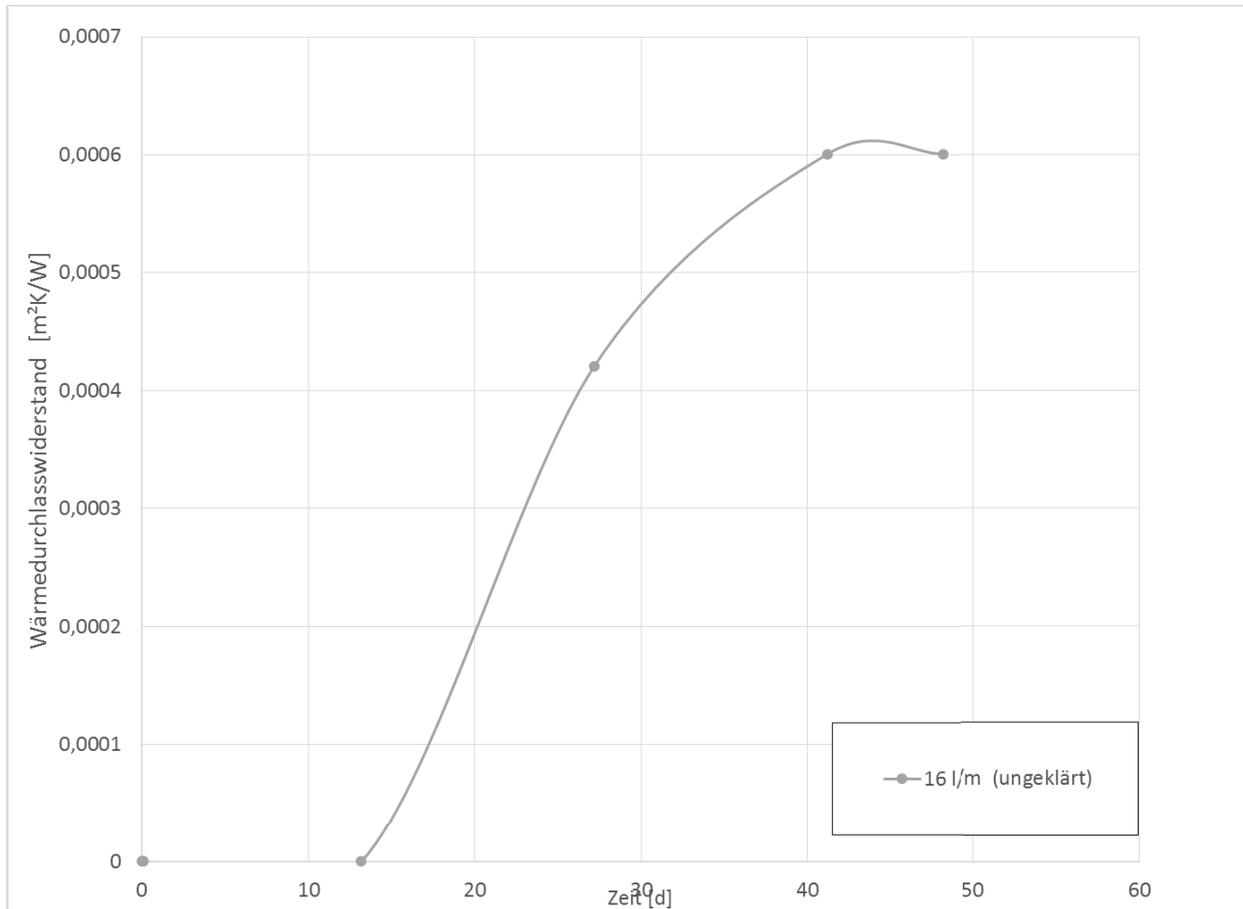
Abbildung 45 zeigt den zeitlichen Verlauf des Biofilmwachstums auf dem PTFE-Wärmeübertrager im wöchentlichen Rhythmus über die 48 Tage des Versuchszeitraums. Zu Beginn ist das Rohr noch frei von Verschmutzungen. Bereits nach der ersten Woche sind Ansammlungen auf der Übertrageroberfläche zu erkennen. Diese Verschmutzungen lagern sich besonders auf der Rohrober- und -unterseite an. Über den zeitlichen Verlauf zeigt sich, dass sich Verschmutzungen auch seitlich anlagern können (Woche 3). Diese werden teilweise im Verlauf der darauf folgenden Woche wieder abgespült. In der zweiten Hälfte der Versuchsreihe ist ein deutlich stärkeres Wachstum zu erkennen. So nimmt in den letzten drei Wochen nicht nur die Dicke des Biofilms schneller zu, sondern auch der Anteil der bewachsenen Fläche. An Tag 48 (letztes Bild) ist der Großteil der Wärmeübertrageroberfläche verschmutzt.



**Abbildung 46:** Wärmeübertragerleistung des PTFE-Wärmeübertragers bei ungeklärtem Abwasser

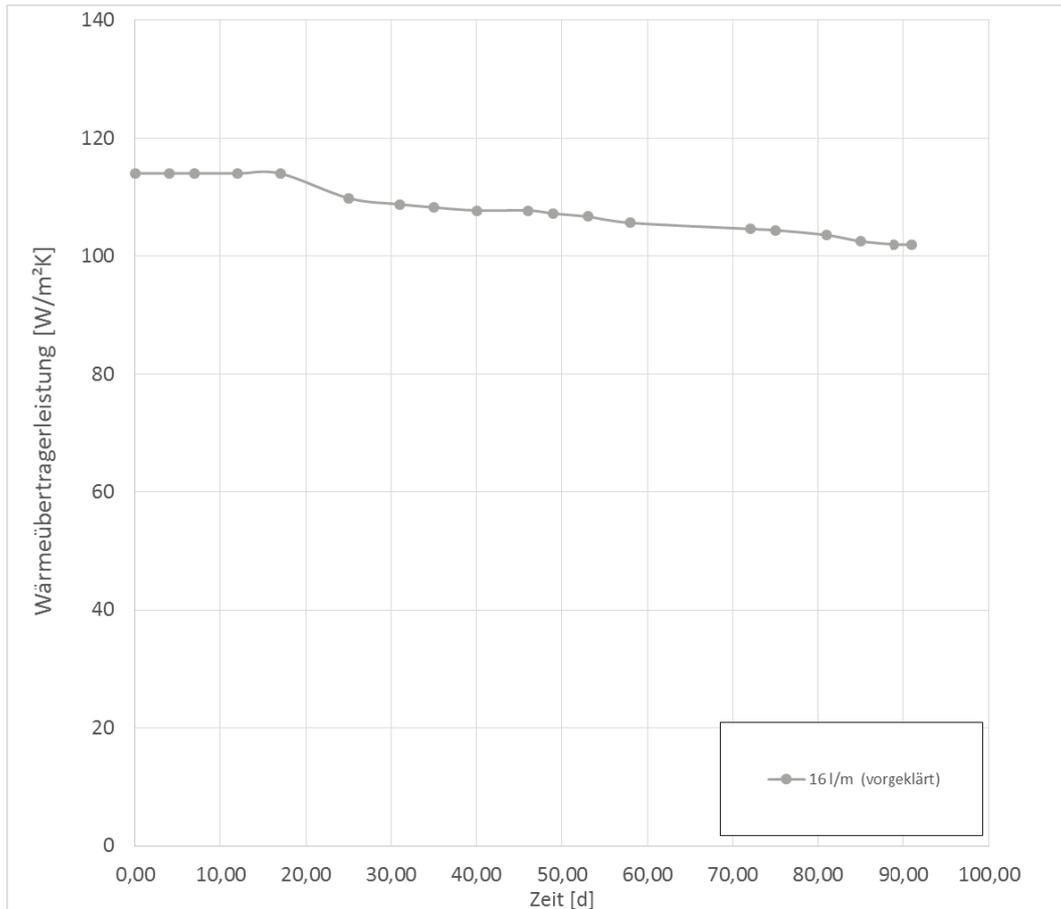
Wie eingangs erläutert, wird der PTFE-Wärmeübertrager aufgrund des hohen Materialwärmehdurehgangswiderstandes lediglich bei einem Volumenstrom von 16 l/min vermessen. **Abbildung 46** zeigt die Wärmeübertragerleistung des PTFE-Wärmeübertragers bei ungeklärtem Abwasser. Die Wärmeübertragerleistung liegt zu

Beginn der Messung bei  $109 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  und reduziert sich innerhalb von 48 Tagen auf  $105 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}$ . Dies entspricht einer Reduktion von 4 Prozent. Daraus errechnet sich der durchlasswiderstand, dargestellt in **Abbildung 47**.



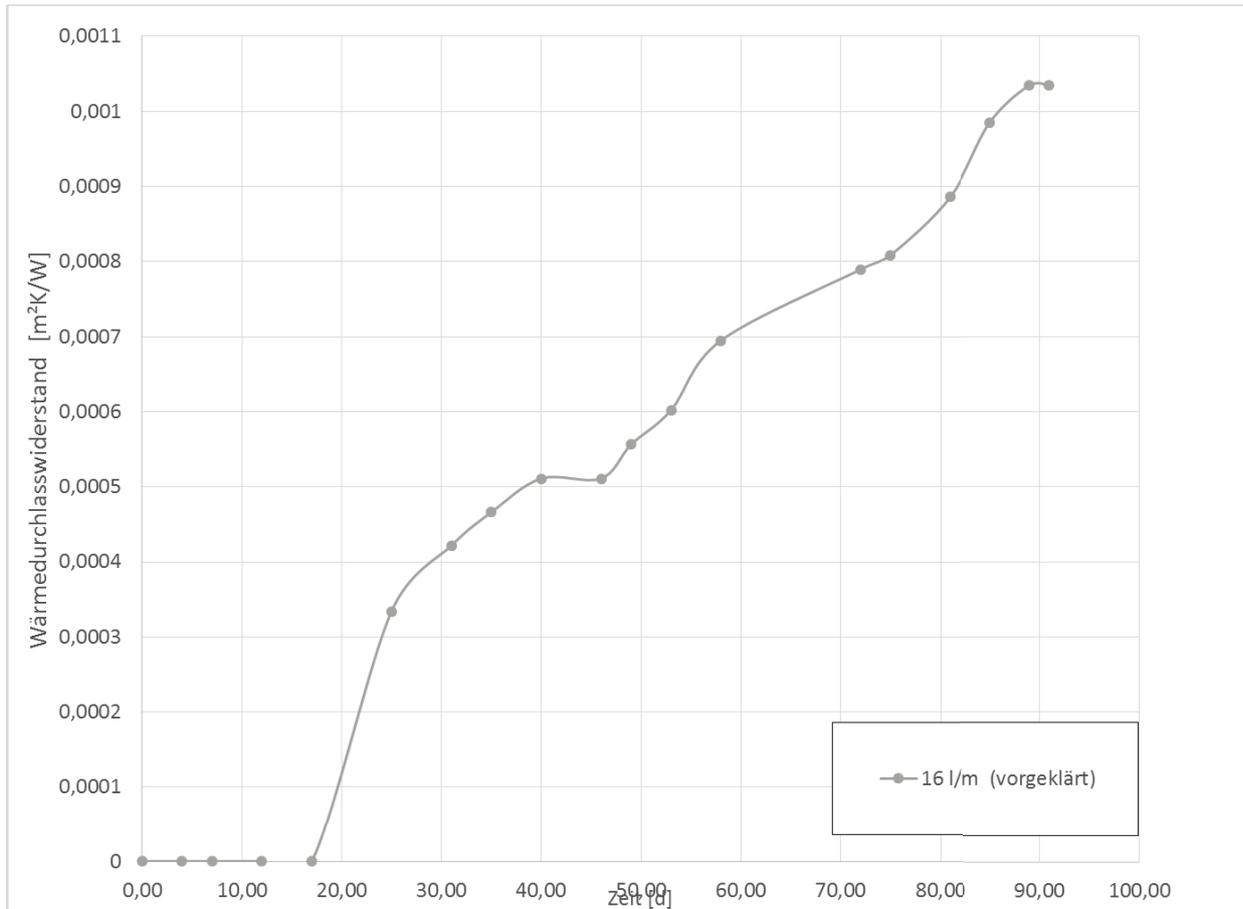
**Abbildung 47:** Wärmedurchlasswiderstand des Biofilms auf dem PTFE-Wärmeübertrager bei ungeklärtem Abwasser

Nach 48 Tagen beträgt der Wärmedurchlasswiderstand des Biofilms bei ungeklärtem Abwasser  $0,0006 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$ . Die Messung bei vorgeklärtem Abwasser ist für einen Zeitraum von 92 Tagen in **Abbildung 48** dargestellt. In diesem Zeitraum verringert sich die Leistung der Wärmeübertragers von  $109 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  auf  $97,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ , was einer Reduktion von 10,5 Prozent entspricht.



**Abbildung 48:** Wärmeübertragerleistung des PTFE-Wärmeübertragers bei vorgeklärtem Abwasser

Der sich daraus bei ungeklärtem Abwasser einstellende Wärmedurchlasswiderstand durch Biofilm ist in **Abbildung 49** dargestellt. In einem Zeitraum von 91 Tagen erreicht der Wärmedurchlasswiderstand bei 16 l/min einen Wert von 0,00108 (m<sup>2</sup> K)/W und einen Wert von 0,00078 (m<sup>2</sup>K)/W für einen Volumenstrom von 4 l/min.



**Abbildung 49:** Wärmedurchlasswiderstand des Biofilms auf dem PTFE-Wärmeübertrager bei vorgeklärtem Abwasser

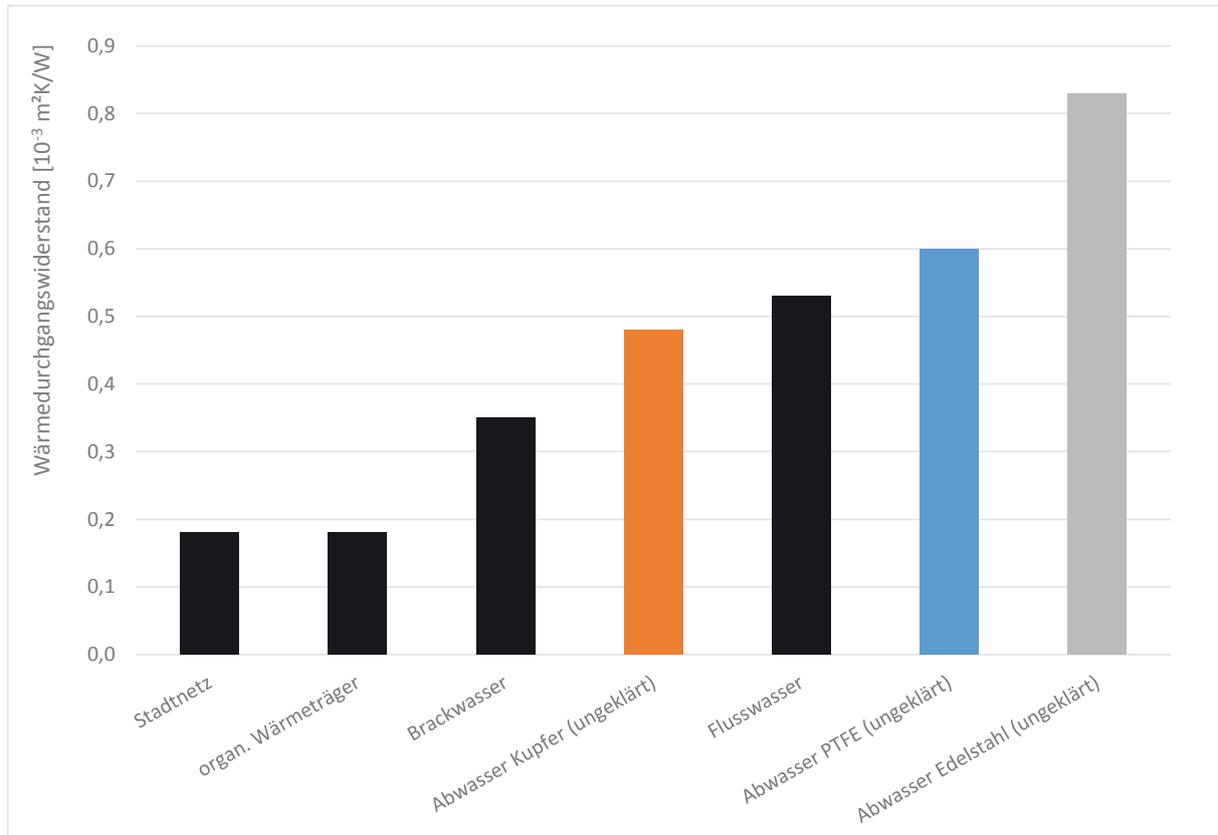
#### 5.4 Zusammenfassung der Wärmeübertragsreduktion

Eine Zusammenfassung der Messergebnisse ist in **Tabelle 3** dargestellt. Ersichtlich sind jeweils die Wärmeübertragerleistungen der unverschmutzten Wärmeübertrager mit vor- und ungeklärtem Abwasser. Der höchste Wärmedurchlasswiderstand durch Biofilm stellt sich auf dem Edelstahlwärmeübertrager bei ungeklärtem Abwasser ein.

**Tabelle 3:** Übersicht über Wärmeübertragungsminderung auf den verschiedenen Wärmeübertragern

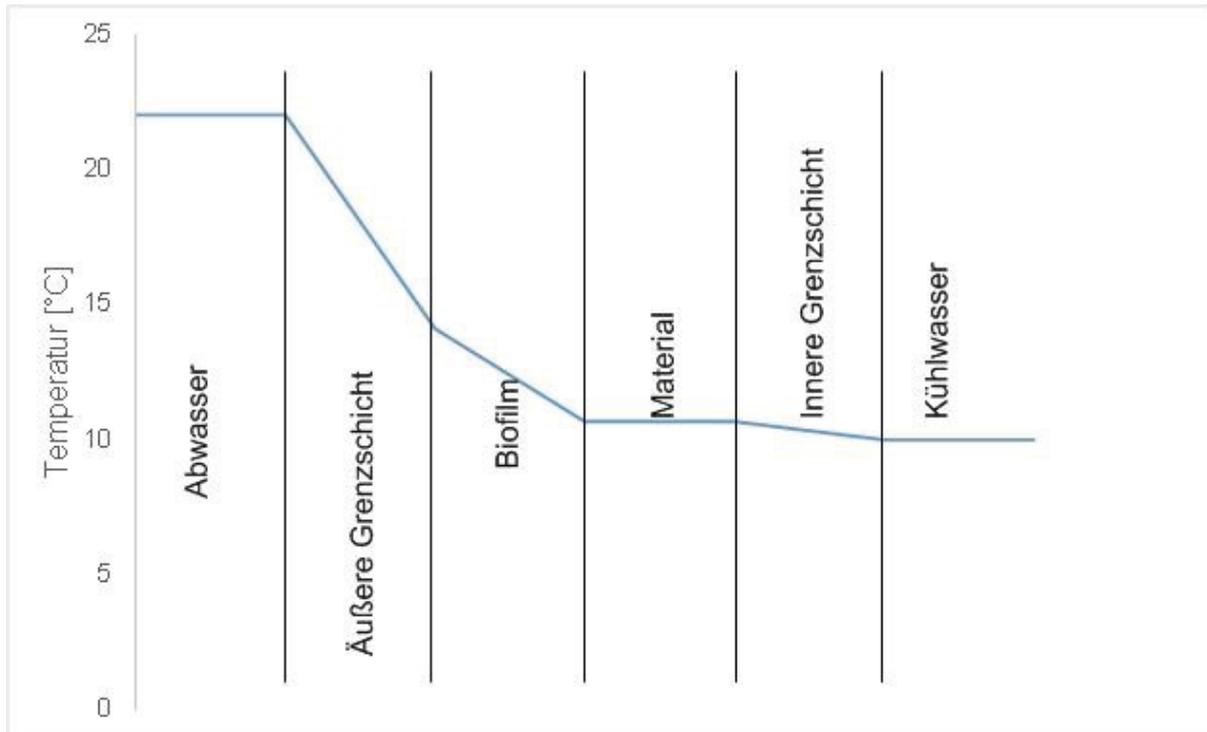
		Edelstahl			Kupfer			PTFE	
Volumenstrom Abwasser	$\left[\frac{l}{\text{min}}\right]$	4	8	16	4	8	16	16	
Wärmedurchgang des Wärmeübertragers (sauber)	$\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$	350	370	473	358	379	488	114	
Wärmedurchgang des Wärmeübertragers nach der Versuchsreihe	vorgeklärt	$\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$	259	288	349	280	320	400	97,5
	ungeklärt		256	281	314	277	315	394	106
Wärmedurchlasswiderstand Biofilm nach der Versuchsreihe	vorgeklärt	$\left[\frac{m^2 K}{W} 10^{-3}\right]$	1	0,77	0,75	0,78	0,49	0,45	1,03
	ungeklärt		1,12	0,84	0,83	0,813	0,533	0,48	0,6

Um die gemessenen Wärmedurchgangswiderstände vergleichshalber einordnen zu können, zeigt **Abbildung 50** einige Fouling-Widerstände. Dabei sind die schwarz gekennzeichneten Balken aus den TEMA Tabellen für Kühlwassertemperaturen bis 50°C, Heizwassertemperaturen bis 115°C und Fließgeschwindigkeiten unter 1 m/s. Die Werte werden von der TEMA materialunabhängig angegeben. Die drei farbigen Balken stellen die maximal gemessenen Wärmeübergangswiderstände der Versuchsreihe dar. Sie sind für den PTFE-Rohrbündel-Wärmeübertrager nach 48 Tagen und für die Rohrwendel-Wärmeübertrager aus Edelstahl nach 95 Tagen und aus Kupfer nach 109 Tagen des Bewuchses bei einer Leistungsmessung mit einem Durchfluss von 16 l/min bei ungeklärtem Abwasser bestimmt.



**Abbildung 50:** Wärmeübergangswiderstände durch Biofilme in verschiedenen Medien

Während der ermittelte Wärmeübergangswiderstand des Kupfer-Wärmeübertragers in etwa dem Wert für Flusswasser aus den TEMA-Tabellen entspricht, so liegen die Werte für den PTFE- und den Edelstahl-Wärmeübertrager oberhalb der hier angeführten Vergleichswerte



**Abbildung 51:** Exemplarischer Temperaturverlauf am Wärmeübertrager

Der Temperaturverlauf während eines Wärmeübertragsvorgangs ist für den Edelstahlwärmeübertrager exemplarisch in **Abbildung 51** dargestellt. Der Temperaturabfall wurde anhand der Messwerte rechnerisch ermittelt. Das Abwasser hat in diesem Fall eine Temperatur von 22 °C und das Kühlwasser innerhalb des Wärmeübertragers hat eine Temperatur von 10 °C. Vereinfachend wurde der Temperaturverlauf linear dargestellt. Der höchste Temperaturabfall befindet sich in der äußeren Grenzschicht. Hier geht die Temperatur bis auf 14,1 °C herunter. Die anschließende Biofilmschicht führt zu einem Temperaturabfall auf 10,7 °C. Das Material des Wärmeübertragers hat in diesem Fall fast keinen Einfluss. An der inneren Grenzschicht fällt die Temperatur auf die Temperatur des Kühlwassers von 10 °C.

Die durchgeführten Messungen zeigten eine Reduktion des Wärmeübertrags. Konstruktionsbedingt treten bei dem Versuchsstand relativ geringe Volumenströme auf. Dies resultiert in einem verhältnismäßig hohen äußeren Wärmeübergangswiderstand. Daher handelt es sich bei den untersuchten Wärmeübertragern, um verhältnismäßig schlechte Wärmeübertrager. Bei anderen Wärmeübertragertypen, mit geringeren Wärmeübergangswiderständen ergibt sich demzufolge eine deutlich höhere, relative Wärmeübertragsminderung durch Biofilm. In **Tabelle 4** ist exemplarisch dargestellt, wie sich der Biofilm auf andere Wärmeübertragertypen auswirkt.

**Tabelle 4:** Exemplarische Übertragung der Wärmedurchgangswiderstände auf andere Wärmeübertragertypen

	Einheit	Rohrwendelwärm eübertrager (Versuchsstand)	Rührkessel	Plattenwärm eübertrager (Kanalisation)	Plattenwärm eübertrager (Heizungstechnik)
Innerer Wärmeübergangs- widerstand	$\left[\frac{m^2 K}{W}\right]$	0,00016	0,0001	0,0001	0,0001
Wärmeübergangs- widerstand des Materials	$\left[\frac{m^2 K}{W}\right]$	0,00006	0,00006	0,00006	0,00006
Äußerer Wärm eübergangswider- stand	$\left[\frac{m^2 K}{W}\right]$	0,00264	0,001	0,00067	0,0001
Wärmeübergangs- widerstand durch Biofilm	$\left[\frac{m^2 K}{W}\right]$	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
Wärmeübertrager- leistung ohne Biofilm	$\left[\frac{m^2 K}{W}\right]$	350	862	1205	3846
Wärmeübertrager- leistung mit Biofilm	$\left[\frac{m^2 K}{W}\right]$	273	510	613	943
Wärmeübertrags- minderung	[%]	22	41	49	75

Der angenommene Wärmedurchgangswiderstand durch Biofilm wurde zu 0,0008 angesetzt und entspricht somit in etwa den Messwerten bei dem Edelstahlwärmeübertrager. Bei dem im Versuchsstand verwendeten Rohrwendelwärmeübertrager führt der Biofilm zu einer Wärmeübertragsreduktion von 22 Prozent. Für die anderen Wärmeübertragertypen wurden typische äußere Wärmeübergangswiderstände angesetzt. Da diese deutlich geringer sind, fällt die relative Wärmedurchgangsreduktion deutlich höher aus. Bei einem Rührkessel würde sich der Wärmeübertrag um 41 Prozent mindern. bei einem Plattenwärmeübertrager wie er in der Kanalisation eingesetzt wird, würde eine Reduktion von 49 Prozent auftreten und bei einem Plattenwärmeübertrager der Heizungstechnik errechnet sich eine Wärmeübertragsreduktion von 75 Prozent.

## 5.5 Fehlerrechnung

Bei allen Ergebnissen der durchgeführten Messungen ist festzustellen, dass stets eine Differenz zwischen abgegebener und aufgenommener Leistung auftritt. Da nach herrschender Theorie kein Wärmegewinn oder -verlust auftreten darf, ist diese Differenz auf Messfehler zurückzuführen. Um einen Bereich bestimmen zu können, in dem der wahre Wert für die übertragene Leistung liegt, ist es notwendig eine Fehlerabschätzung durchzuführen. Dazu müssen die Fehler betrachtet werden, die die Temperaturmessung und die daraus folgenden Berechnungen beeinflussen. Beim

vorliegenden Versuchsstand sind dies die Fehler, die bei der Temperaturmessung durch die Sensoren auftreten und die Messfehler, die bei der Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeiten auftreten.

Um eine möglichst hohe Genauigkeit der Messergebnisse zu erhalten, wurden keine Einzelmessungen durchgeführt, sondern die Messungen wurden über ein Intervall von 10 Minuten gemessen. Da im Sekundentakt Temperaturen und Massenströme gemessen wurden, ergibt sich so, dass für die Bestimmung eines Wärmedurchgangskoeffizienten 600 Temperaturwerte an jeder Messstelle redundant und 600 Messwerte für den Massenstrom arithmetisch gemittelt wurden. Dies führt zu minimierten Einzelfehlern. Die statischen Messfehler wurden weitestgehend durch eine Kalibrierung der Messinstrumente herausgerechnet. Trotzdem sind nach dem Einbau der Messinstrumente in den Versuchsstand noch Messungenauigkeiten zu beachten. Die Abweichungen der Temperatursensoren liegt nach mehreren Vergleichsmessungen der Fühler unter 0,05 K. Somit können Temperaturdifferenzen mit einem Fehler kleiner als 0,05 K gemessen werden. Die Messungenauigkeit der MIDs liegt unter 1 Prozent. Da jede Einzelmessung mit einem Fehler behaftet ist, muss ermittelt werden, wie sich der Fehler auf das Gesamtergebnis auswirkt. Daher wird eine Fehlerfortpflanzung nach dem „Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz“ durchgeführt.<sup>64</sup>

Der Messfehler bei den Messungen des Volumenstroms ergibt sich zu 1 Prozent. Bei den Temperaturmessungen wird von einem Fehler von  $\pm 0,05$  K ausgegangen. Der Fehler wirkt sich relativ betrachtet insbesondere bei sehr kleinen Temperaturdifferenzen hoch aus. Bei den Temperaturdifferenzen im Klarwasserstrom führt dieser Fehler bei Edelstahl und Kupfer zu einem Fehler kleiner 2 Prozent. Im Gegensatz dazu liegt hier der Fehler bei PTFE aufgrund des schlechteren Wärmedurchgangs und der geringeren Temperaturdifferenz bei über 6 Prozent.

Die absolute Entzugsleistung durch den Wärmeübertrager kann für Kupfer und Edelstahl sehr genau (ca. 2 Prozent) bestimmt werden. Auch hier liegt die Messungenauigkeit bei PTFE bei über 6 Prozent. Die temperaturspezifische Wärmeübertragerleistung kann für alle Wärmeübertrager mit einer hohen Genauigkeit bestimmt werden.

Wesentlich für die Messergebnisse zur Bestimmung des Foulingwiderstands sind die Vergleiche der Messungen zu Beginn und zum Ende der jeweiligen Versuchsreihe. Dies kann bei Edelstahl grundsätzlich mit einer relativen Messungenauigkeit von knapp unter 5 Prozent realisiert werden. Bei Kupfer liegt die Ungenauigkeit aufgrund der nominal geringeren Veränderung bei ca. 8 Prozent. Bei PTFE wurde nominal aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit nur eine Veränderung von 7 W/ m<sup>2</sup>K gemessen. Aufgrund dieser sehr geringen Änderung ist dies mit einer Unsicherheit von 88 Prozent behaftet. Das bedeutet, die sich hier ergebenden Wärmedurchlass-

---

64 Vgl. Eden und Gebhard, 2014, S.34 ff.)

widerstände sind für Edelstahl  $0,00083 \pm 0,00004$  ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ), für Kupfer  $0,00048 \pm 0,00004$  ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ) und für PTFE  $0,0005 \pm 0,00044$  ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ). Damit ist der gemessene Wert für PTFE aufgrund des hohen potentiellen Messfehlers für weitere Berechnungen nur unter großen Einschränkungen zu verwenden. Die Werte für Edelstahl und Kupfer liefern in dem angegebenen Intervall verlässliche Messwerte.

## 5.6 Empfehlungen für weitere Messungen

Die hier durchgeführten Messungen wurden mit einer möglichst hohen Genauigkeit durchgeführt. Wie sich zeigt, reicht diese Genauigkeit nicht aus, um den PTFE-Wärmeübertrager ausreichend zu vermessen. Zu einer weiteren Steigung der Messgenauigkeit sollten zukünftige Versuchsstände noch größer dimensioniert werden. Die Abwassertemperatur wurde stetig um die ca.  $20$  °C gehalten. Nach Möglichkeit sollten auch andere Temperaturniveaus untersucht werden. Weiterhin könnten noch weitere Anström- und Reinigungsverfahren erprobt werden.

Für die weitere Forschung empfiehlt es sich eine neu gebaute Abwasserwärmerückgewinnungsanlage vollumfänglich mit Messtechnik auszustatten und diese einem Langzeitmonitoring zu unterziehen.

## 6 Reinigung des Wärmeübertragers

Es liegt an dem Betreiber einer technischen Anlage, eine Schwelle zu definieren, um die Verunreinigung auf einem Wärmeübertrager auf einem tolerierbaren Niveau zu halten. Angenommen, über den Versuchszeitraum, in welchem sich Bewuchsphasen und Messintervalle abwechselten, wurde die definierte Schwelle überschritten. So wird nach dem Nachweis einer Wärmeübertragsreduktion im folgenden Kapitel nach Möglichkeiten gesucht, angefallene Verschmutzungen in Form von Ablagerungen und Partikeln ganz oder teilweise von der Wärmeübertrageroberfläche abzureinigen.

Da aus dem vorliegenden Versuchsstand das Wasser ohne weitere Prüfung in die Kanalisation abgelassen wird, werden chemische Reinigungsverfahren, welche eine Veränderung des Abwassers zur Folge haben, zunächst nicht weiter betrachtet. Zur Abreinigung werden daher ausschließlich mechanische Verfahren angewendet. Zur Reinigung der Wärmeübertrageroberflächen kamen ein On-Stream und drei Off-Stream Verfahren zum Einsatz.

- On-Stream-Reinigungsverfahren
  - Erhöhung und Umkehr der Strömungsgeschwindigkeit
- Off-Stream-Reinigungsverfahren
  - Abreinigung mittels Wischen
  - Abreinigung mittels Hochdruck

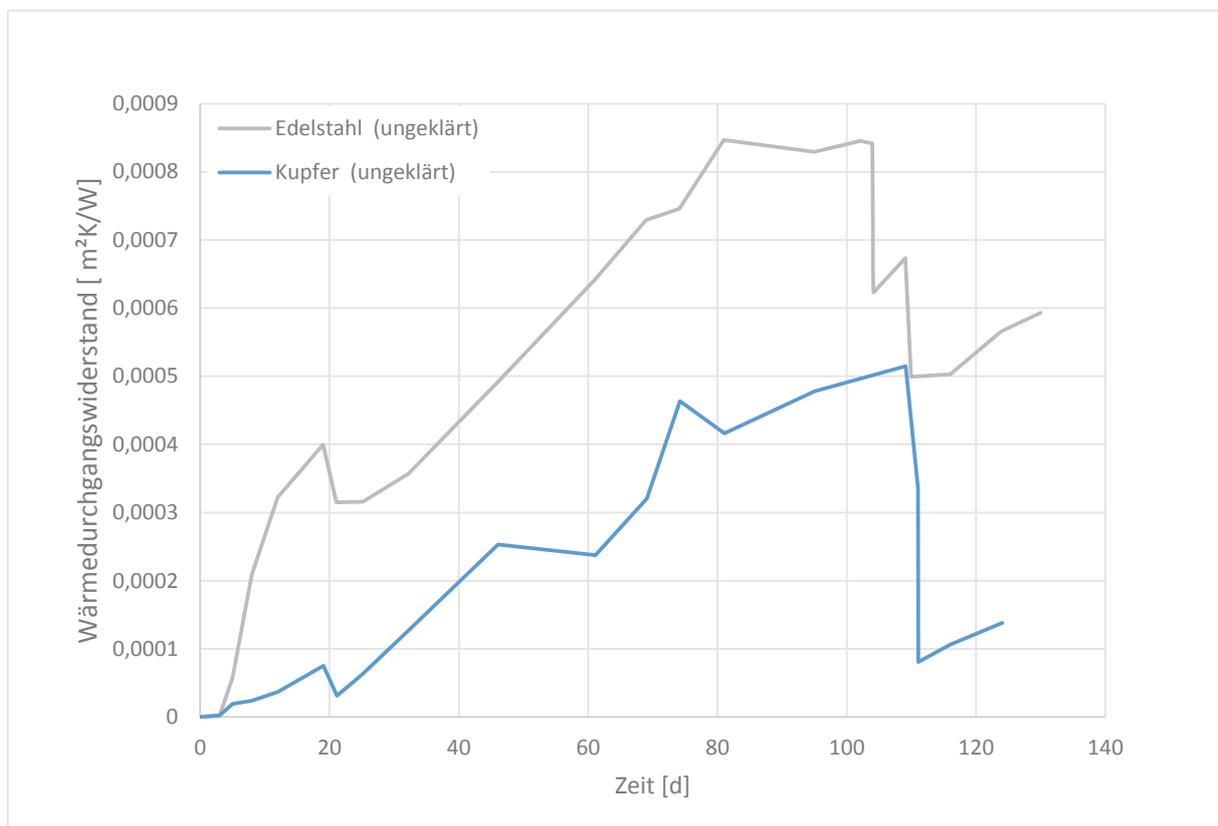
Im Optimalfall lässt sich im montierten Zustand (On-Stream) eine Abreinigung des Wärmeübertragers erzielen, welche in guter Näherung dem verschmutzungsfreien Ausgangszustand entspricht. In jedem Fall führt eine regelmäßige Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit zu einer physikalischen Begrenzung der Biofilm-Dicke.<sup>65</sup> Durch dieses Reinigungsverfahren wird mindestens eine Verminderung des Fouling-Widerstands erwartet. Off-Stream wird nach den oben angegebenen Verfahren gereinigt und im Anschluss untersucht, inwieweit sich die Oberfläche des Wärmeübertragers über den Versuchszeitraum verändert hat.

---

<sup>65</sup> Vgl. Flemming, 2013, S. 151.

## 6.1 Strömungstechnische On-Stream Reinigung

Beim On-Stream Verfahren wurde die Durchflussgeschwindigkeit um den Faktor 20 erhöht. Dies führt zu einer erhöhten Turbulenz im Wärmeübertrager umströmenden Fluid und erhöht die Wandschubspannung an der Übertrageroberfläche. Versuchstandes wurde eine Schneidwerkpumpe der Fa. Wilo in den Versuchstand eingebracht. Hierdurch ist es möglich, den Volumenstrom bis auf ca. 200 Liter pro Minute zu steigern. Dies entspricht einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit außen an dem Wärmeübertrager von 0.11 m/s. Die Wärmeübertrager wurden unterschiedlich lange im Gleich- und Gegenstrom umströmt. In der ersten Versuchsreihe mit ungeklärtem Abwasser kam es während der Reinigung zu konstruktiven Problemen. Daher konnte der Reinigungszyklus nicht so detailliert aufgenommen werden wie der Variante des vorgeklärten Abwassers.



**Abbildung 52:** Wärmeübergangswiderstand des Biofilms

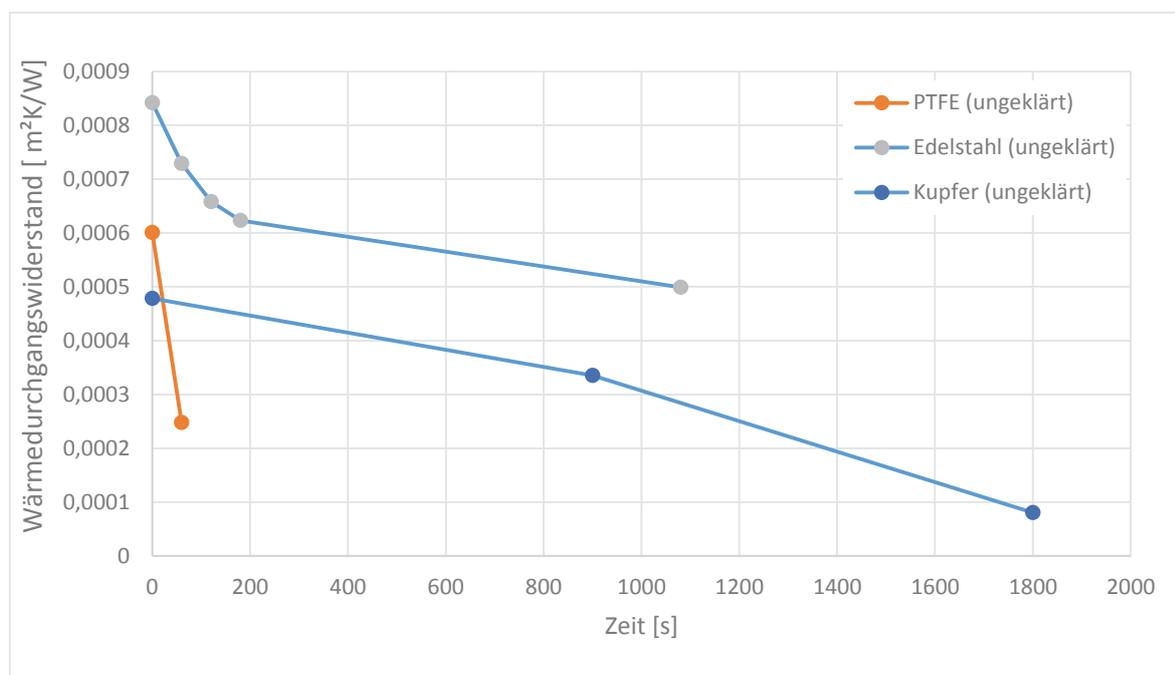
In **Abbildung 52** sind die Wärmeübergangswiderstände der Wärmeübertrager aus Kupfer und Edelstahl über die jeweiligen Messreihenzeiträume bei ungeklärtem Abwasser dargestellt. Die Abreinigung des Kupfer-Wärmeübertragers erfolgt an Tag

111. Die Abreinigung des Edelstahl-Wärmeübertragers erfolgt an den Tagen 104 und 109.

Beim Edelstahl-Wärmeübertrager ist während der On-Stream-Reinigung ein hoher Abtransport von „Biofilmfetzen“ über das zirkulierende und turbulent strömende Umgebungsfluid zu beobachten. Die Trübung des Fluids verändert sich nicht maßgeblich, sodass hier von einem groben Schwebstoffabtransport zu sprechen ist.

Mit dem Start der On-Stream Reinigung des Kupfer-Wärmeübertragers bildete sich schlagartig eine starke Trübung des gesamten Mediums aus. Aufgrund der dunkel grauen bis schwarzen Verfärbung konnte ein erhöhter Fetzenabtransport nicht beobachtet werden. Der Transport an Feinstpartikeln war jedoch enorm. Im Anschluss an die Abreinigung wurde eine erneute, kurze Biofilmwachstumsphase erprobt. Das Biofilmwachstum zeigt im Anschluss einen ähnlichen Verlauf wie zuvor.

Eine detaillierte Darstellung der strömungstechnischen Abreinigung ist in **Abbildung 53** für ungeklärtes und in **Abbildung 54** für vorgeklärtes Abwasser dargestellt. Die Darstellung der Abreinigung erfolgt kumulativ über die Spülzeit. Zwischen den einzelnen Spülungen wurden jeweils Messungen des aktuellen Wärmedurchgangswiderstands des Biofilms durchgeführt. Aufgrund von Mess- und Versuchsfehlern ist die Darstellung bei vorgeklärtem Abwasser deutlich detaillierter als bei ungeklärtem.



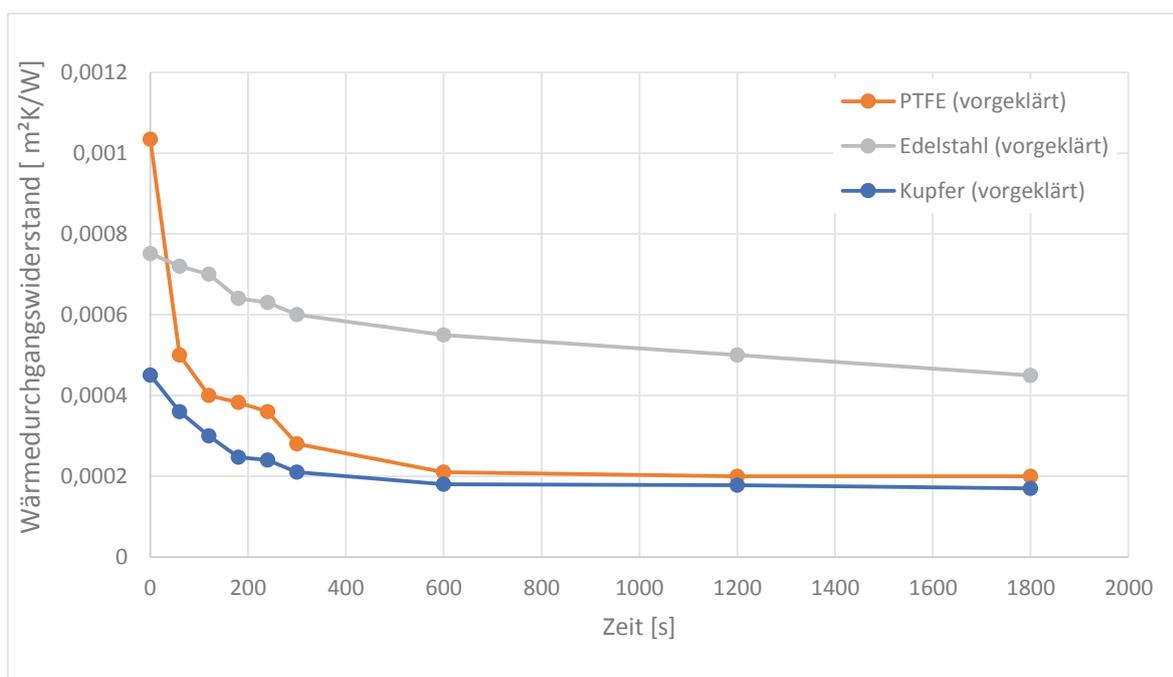
**Abbildung 53:** Detaillierte Darstellung der strömungstechnischen Abreinigung des Biofilms bei ungeklärtem Abwasser

Auf dem Edelstahlwärmeübertrager wurde zu Beginn der Abreinigung ein Wärmedurchgangswiderstand durch Biofilm von  $0,00084 \text{ (m}^2\text{K)/W}$  gemessen. Nach einer einminütigen Spülung lässt sich dieser auf  $0,0073 \text{ (m}^2\text{K)/W}$  reduzieren. Mit jeder weiteren Spülung nimmt die Abreinigung pro Zeiteinheit ab. Nach drei einminütigen Spülungen, wurde eine 15-minütige Spülung durchgeführt. Insgesamt konnte so der Wärmedurchgangswiderstand nach 18 Minuten auf  $0,00049 \text{ (m}^2\text{K)/W}$  reduziert werden, was einer Abnahme des Biofilms von 40 Prozent entspricht.

Der Kupferwärmeübertrager wurde zwei mal je 15 Minuten strömungstechnisch gereinigt. Nach den ersten 15 Minuten nimmt der Wärmedurchgangswiderstand von  $0,00048 \text{ W/m}^2\text{K}$  auf  $0,00034 \text{ (m}^2\text{K)/W}$  ab. Nach der zweiten Spülung reduziert sich dieser weiter auf  $0,00008 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ . Dies entspricht einer Reduzierung des Wärmedurchgangswiderstands von 83 Prozent.

Der PTFE-Wärmeübertrager konnte bei der ersten strömungstechnischen Reinigung versuchsbedingt nur einmal für eine Minute umspült werden. Hier zeigt sich eine deutliche Abnahme des Wärmedurchgangswiderstandes von  $0,0006 \text{ (m}^2\text{K)/W}$  auf  $0,00025 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ . Dies entspricht einer Reinigung von 59 Prozent.

Nach der Biofilmwachstumsreihe mit vorgeklärtem Abwasser konnten detailliertere Reinigungsversuche durchgeführt werden. Die Messergebnisse sind in **Abbildung 54** dargestellt. Bei jedem der drei Wärmeübertrager zeigt sich, dass die Effizienz der Abreinigung mit zunehmender Reinigungsdauer sinkt. Es zeigt sich ein logarithmischer Verlauf der Kurven.



**Abbildung 54:** Detaillierte Darstellung der strömungstechnischen Abreinigung des Biofilms bei vorgeklärtem Abwasser

Bei dem Edelstahlwärmeübertrager konnte nach einer Spülung von 30 Minuten der Biofilm von  $0,00075 \text{ (m}^2\text{K)/W}$  auf  $0,00045 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ . Die gesamte Reduktion des Wärmedurchgangswiderstandes beträgt 40 Prozent. Durch die 30-minütige Abreinigung des Kupferwärmeübertragers erfolgt eine Reduktion des Wärmedurchgangswiderstandes von  $0,00045 \text{ (m}^2\text{K)/W}$  auf  $0,00017 \text{ (m}^2\text{K)/W}$  reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion von 62 Prozent. Die identische Reinigung führt bei dem PTFE-Wärmeübertrager zu einer Reduktion des Wärmedurchgangswiderstandes von  $0,001 \text{ W/m}^2\text{K}$  auf  $0,0002 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ . Somit kann der Wärmedurchgangswiderstand auf dem PTFE-Wärmeübertrager durch eine strömungstechnische Reinigung um 80 Prozent reduziert werden.

## 6.2 Mechanische Off-Stream Reinigung

Bei der Abreinigung im demontierten Zustand des Wärmeübertragers (Off-Stream) wurden Reinigungen in Form von Wischen (Papier und Baumwoll-Tücher) und einem Hochdruckreiniger (max. Druck 20 bar mit Vario Power Jet Druckpistolenaufsatz) vorgenommen. Genauere Beobachtungen werden in den nachfolgenden Kapiteln für die einzelnen Materialien beschrieben.

In **Abbildung 55** sind die drei Wärmeübertragermaterialien PTFE, Kupfer und Edelstahl nach dem Ausbau aus dem Versuchsstand abgebildet. Auf allen Materialien ist ein deutlicher Biofilm zu erkennen.



**Abbildung 55** : Foto der Wärmeübertrager PTFE, Kupfer und Edelstahl nach dem Ausbau

### 6.2.1 Reinigung der Edelstahl-Rohrwendel



**Abbildung 56** : Mechanische Reinigung des Edelstahl-Rohrwendel-Wärmeübertragers

Nach Abschluss der Versuchsreihe ist die Oberfläche des Edelstahl-Wärmeübertragers bräunlich bis schwarz verunreinigt. Das Schauglas ist mit Ablagerungen und ebenfalls bräunlich bis schwarzen „Biofilmfetzen“ benetzt, an einigen Stellen jedoch noch durchsichtig. Im ausgebauten Zustand bestätigt sich die bräunlich-schwarze Färbung bedingt durch die Verschmutzung. Es zeigt sich ein heterogener Aufbau der Verschmutzungsschicht ohne einheitliche Dicke. Die Wendeln sind umlaufend benetzt, wobei seitliche Bereiche der Rohrwendel schwächer benetzt sind und eine stärkere Tendenz für Ablagerungen auf den im eingebauten Zustand oben liegenden Flächen zu erkennen ist. Zusätzlich ist eine schwächere Benetzung im Bereich des Einlaufs des Mediums zu erkennen.

Eine Abreinigung mittels Bürste und Papiertuch ist problemlos und ohne den Aufwand erhöhten Drucks rückstandsfrei möglich (vgl. **Abbildung 56**). Es treten keine großen Haftkräfte auf. Sowohl die Reinigung mittels Hochdruckreiniger als auch mittels Druckluft zeigen den gleichen Erfolg, wobei die Abreinigungsneigung durch Druckluft mit zunehmender Austrocknung der Ablagerungen abnimmt.

Nach der Reinigung ist die Edelstahl-Oberfläche rückstandslos und verfärbungsfrei. Sie weist keine fühlbare Veränderung der Rauheit auf. Der ursprüngliche Glanz ist auch nach der Versuchsreihe vorhanden und das Material nicht erkennbar matter geworden.

### 6.2.2 Reinigung der Kupfer-Rohrwendel



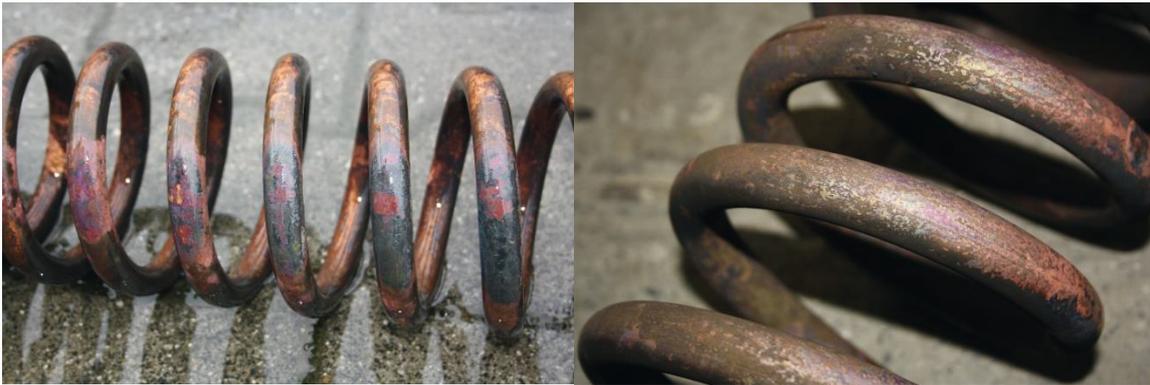
**Abbildung 57** : Mechanische Reinigung des Kupfer-Rohrwendel-Wärmeübertragers

Das Material Kupfer zeigt die stärkste Reaktion. Bereits nach wenigen Wochen der Versuchsreihe kam es zu Verfärbungen der Rohrwendeloberfläche, woraufhin sich rasch eine schwarz-bläuliche Schicht am Schauglas bildete. Diese Verfärbungen weichen von den zu beobachtenden Biofilmschichten auf der Oberfläche des Edelstahl-Wärmeübertrages enorm ab. Schon im frühen Versuchsstadium benetzten diese Verunreinigungen das Schauglas und verhinderten die Sicht auf den Wärmeübertrager vollständig.

Im ausgebauten Zustand zeigt sich auf dem Übertrager eine matte, vollständige Benetzung bestehend aus einem zähen, schmierigen schwarzen Biofilm. Ohne einheitliche Dicke kann von einem erhöhten Biofilmvorkommen im Bereich der Wendeloberseiten gesprochen werden. Aufgrund seiner Konsistenz haftet der Biofilm im Vergleich zum Edelstahl-Wärmeübertrager deutlich besser am Material.

Nach dem Abwischen mittels Papiertuch verbleibt ein zäher Rückstand auf der Oberfläche (vgl. **Abbildung 57**). Eine zufriedenstellende Reinigung ist nur unter großem Kraftaufwand und sorgsamer Arbeit möglich. Eine vollständige Reinigung ist mit diesem Verfahren nur schwer möglich. Noch weniger Wirkung erzielt der Einsatz von Luftdruck. Der Luftstrom trocknet den Biofilm aus und erschwert so die Abreinigung. Gute Erfolge können hingegen mit einem Hochdruckreiniger erzielt werden. Durch Zentrierung der Düse wird der Biofilm abgetragen und erst so kann die Kupferoberfläche freigelegt werden.

Selbst durch die Hochdruckreinigung kann der Biofilm nur teilweise entfernt werden, sodass leichte Rückstände bestehen bleiben. Das Material der Kupfer-Rohrwendel hat sich in seiner Rauheit und Färbung verändert. Die Oberfläche weist Vertiefungen auf und ist in ihrer Gesamtheit wesentlich rauer geworden. Farblich hat sich das Material von einem glänzenden Kupfer-Rot hin zu einer variierenden Färbung entwickelt, welche sich in einem Farbbereich von Rot über Orange bis Schwarz erstreckt (vgl. **Abbildung 58**).



**Abbildung 58** : Kupfer-Rohrwendel-Wärmeübertrager nach der Reinigung

Diese Kupferreaktion begann nach wenigen Wochen in Form einer dunklen Verfärbung der Rohrwendeloberfläche und es bildete sich eine schwarz-bläuliche Schicht am Schauglas. Diese Verfärbungen weichen von den zu beobachtenden Wachstumsverläufen auf der Oberfläche des Edelstahl-Wärmeübertrages ab.

Zunächst wurde für die Reaktion ein Zusammenhang zu dem im parallel liegenden Wärmeübertrager installierten Edelstahl vermutet, wenngleich während der Einwirkzeit des Abwassers alle Schieber geschlossen worden waren, um eine direkte Verbindung zwischen den Materialien zu verhindern. Kupfer ist aufgrund der Stellung auf der positiven Seite der elektrochemischen Spannungsreihe durch andere Metalle nicht gefährdet. Auch der Zusammenbau von Kupfer und Edelstahl ist nach heutigem Stand des Wissens bedenkenlos möglich.<sup>66</sup>

Die Verfärbung muss das Resultat aus dem Kontakt des Werkstoffs mit dem Umgebungsmedium sein. Kupfer weist im Regelfall bei der Verwendung als Baustoff (bspw. im Dachbereich der Witterung ausgesetzt) eine gute Korrosionsbeständigkeit auf, weil das Material stabile Deckschichten ausbildet, die es schützen. Für den Einsatz in Fluiden ist für eine Beständigkeit des Werkstoffes ein pH-Wert im alkalischen

---

<sup>66</sup> Vgl. Zilch, et. al., 2013, S. 1028.

Bereich günstig.<sup>67</sup> So haben Kupferwerkstoffe in Grund- und Oberflächenwässern im pH-Bereich 6 bis 8 eine sehr geringe Korrosionswahrscheinlichkeit, weil auch hier gut schützende Deckschichten entstehen.<sup>68</sup> In sauerstoffarmen Wässern ist die Korrosionsgeschwindigkeit von Kupfer sogar so klein, dass in korrosionstechnisch geschlossenen Anlagen praktisch keine Korrosionsschäden auftreten. So traten auch bei der Prüfung eines zirkulierenden Heizungssystems, welches durch gelegentlich, regelmäßig oder ständig während des Betriebes möglichen Sauerstoffeintrag charakterisiert ist, im Allgemeinen für Kupfer und seine Legierungen keine ungünstigen Korrosionserscheinungen auf.<sup>69</sup>

Bei niedrigen pH-Werten, welche unter Biofilmen vorherrschen, findet bei Abwesenheit von Sauerstoff ein selektiver Angriff des Zinks (Entzinkung) in Kupferlegierungen statt.<sup>70</sup> Eine Zinklegierung wird im Versuchsstand jedoch nicht verwendet.

Ein Angriff des Kupfers kann erfolgen, wenn das Umgebungsmedium Oxidationsmittel enthält oder selbst oxidierend wirkt. In diesem Zusammenhang ist z.B. das Vorkommen von Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ ) in Abwasserleitungen ein bekanntes Problem. Dieses übelriechende Gas entsteht durch den Abbau schwefelhaltiger organischer und anorganischer Abwasserinhaltsstoffe unter anaeroben Bedingungen. Somit kann sich grundsätzlich in jeder Art von Abwasser  $H_2S$  bilden. Durch das Trinkwasser werden Sulfationen in hohen Konzentrationen in das kommunale Abwassernetz eingeleitet. Diese dienen als Schwefelquelle bei der Bildung von  $H_2S$ . Die starke Korrosionswirkung kommt dadurch zustande, dass der  $H_2S$  an den Bauteilen, die der Kanalatmosphäre ausgesetzt sind zu Schwefelsäure oxidiert wird. Schwefelsäure führt zu Korrosion im Kanalsystem und verursacht hohe Instandsetzungskosten.<sup>71</sup>

In Anlagen mit Eintrag von Sauerstoff werden bei Anwesenheit von  $H_2S$  vereinzelt Schäden beobachtet, die darauf zurück zu führen sind, dass vorhandene Kupferoxiddeckschichten ( $Cu_2O$ ) in Kupfersulfidschichten ( $Cu_2S$ ) umgewandelt werden. Diese Kupfersulfidschichten wirken nicht mehr korrosionsschützend.<sup>72</sup>

Die schwarzbläuliche Verfärbung des Schauglases lässt demnach eine Bildung von Kupfersulfid vermuten, was die schützenden Deckschichten zerstört und so eine Korrosion ermöglicht.

---

<sup>67</sup> Vgl. Richtlinie VDI 2035 Blatt 2, S. 9.

<sup>68</sup> Vgl. DIN 50929:1985-09 Teil 3, S. 9.

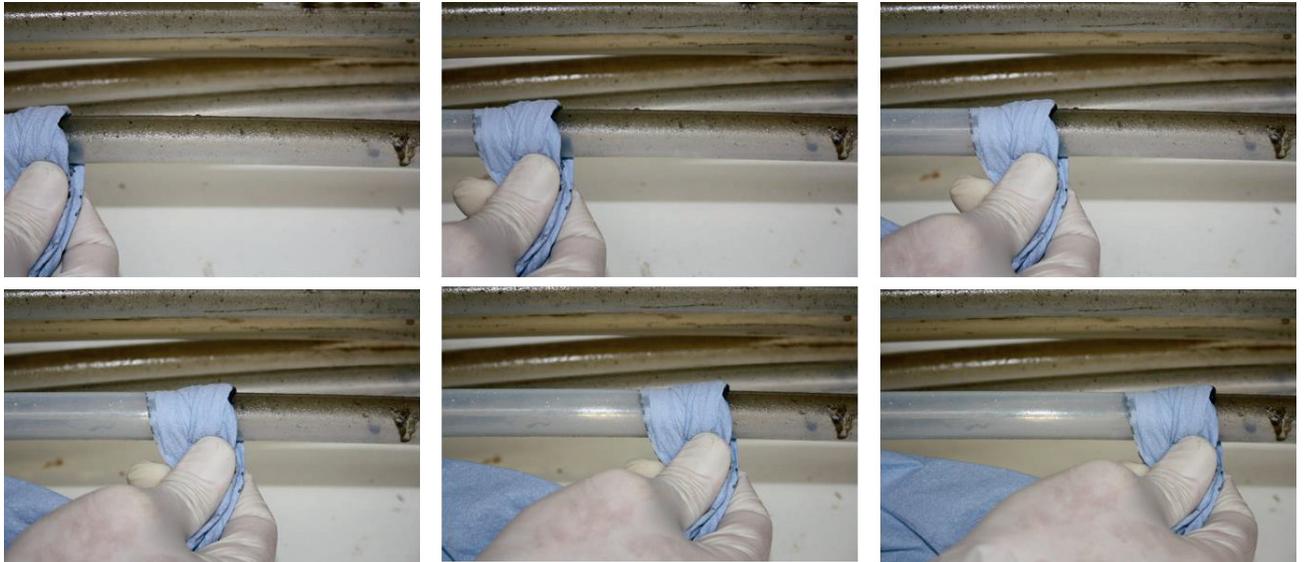
<sup>69</sup> Vgl. DIN EN 14868:2004-01, S. 12.

<sup>70</sup> Vgl. Richtlinie VDI 2035 Blatt 2, S. 11

<sup>71</sup> Vgl. Kronos International, 2007, S. 1 f.

<sup>72</sup> Vgl. Richtlinie VDI 2035 Blatt 2, S. 11

### 6.2.3 Reinigung der PTFE-Rohre



**Abbildung 59** : Mechanische Reinigung des 1,7-PTFE-Wärmeübertragers

Die Oberfläche des PTFE-Wärmeübertragers ist im Vergleich zum Kupfer- und Edelstahl-Wärmeübertrager am geringsten verschmutzt. Die Verunreinigungen haben eine gelb bis graue Färbung. Das Schauglas weist nur bedingt Verschmutzungen und Ablagerungen auf. Nach dem Ausbau der PTFE-Rohre ist die gelb-graue Verschmutzung deutlich zu erkennen. Auch hier liegt ein ungleichmäßiger Aufbau der Verschmutzungsschicht ohne einheitliche Dicke vor. Es ist nicht von einer vollständigen Benetzung der Oberfläche zu sprechen. Im seitlichen Rohrbereich ist eine geringe Verschmutzung zu erkennen. Ein schleimartiger Biofilm hat sich auf der Oberseite angelagert und kommt in abgeschwächter Form auf der Unterseite vor. Es erweckt den Anschein, als reichten die Haftkräfte an der PTFE-Oberfläche nicht aus, um eine starke Anlagerung eines Biofilmes zu ermöglichen.

Dementsprechend zeigt das Material auch seine Wirkung bei der Off-Stream Abreinigung. Diese gelingt mit Papier- und Baumwolltüchern sehr leicht. Das bloße Auflegen eines Tuches reicht aus, um den Biofilm rückstandslos zu entfernen (vgl. **Abbildung 59**). Eine Reinigung mittels Wasser und Hochdruck ist gut anwendbar und die Reinigung erfolgreich. Selbst der eingetrocknete Biofilm ist in Form ganzer Biofilmsplitter mit einer Splitterbreite von ca. 0,5 cm beinahe rückstandslos zu entfernen.

Nach der Reinigung ist die PTFE-Oberfläche rückstandslos und verfärbungsfrei. Sie erweckt den Anschein, als sei sie vorher nicht verbaut worden. Sowohl Rauheit als auch Glanz sind nahezu unverändert.

### 6.3 Empfehlungen für die praktische Anwendung bei der Konstruktion von Abwasserwärmeübertragern

Durch die vorliegenden Versuchsstände konnten drei Wärmeübertragertypen im Abwasser untersucht werden. Der Wärmeübertrager aus Kupfer zeigte ein deutlich vermindertes Biofilmwachstum und konnte aufgrund der hohen Wärmeleitung des Materials den höchsten Wärmeübertrag gewährleisten. Allerdings zeigten sich auf dem Kupferwärmeübertrager starke Korrosionserscheinungen. Daher ist ein Kupferwärmeübertrager für den praktischen Einsatz zuvor einer erneuten Prüfung zu unterziehen.

Der Wärmeübertrager aus PTFE hat materialbedingt den geringsten Wärmedurchgang. Eine genaue Bestimmung des Wärmedurchgangswiderstandes durch Biofilm ist auf diesem Wärmeübertrager mit großen Messungenauigkeiten verbunden. Es zeigt sich aber auch hier ein deutliches Wachstum des Biofilms. In Bezug auf die Abreinigung ist der PTFE Wärmeübertrager der Wärmeübertrager, der sowohl strömungstechnisch als auch mechanisch die günstigsten Eigenschaften aufweist.

Der Edelstahlwärmeübertrager zeigt materialbedingt einen leicht geringeren Wärmedurchgang als der Kupferwärmeübertrager und einen deutlich höheren Wärmedurchgang als der PTFE-Wärmeübertrager. Weiterhin wurde der Edelstahlwärmeübertrager nicht durch das Abwasser angegriffen. Daher wird für den Einsatz eines im Feld die Konstruktion eines Wärmeübertragers aus Edelstahl empfohlen.

Sowohl strömungstechnisch, mechanisch als auch unter Hochdruck konnte eine Abreinigung des Biofilms erzielt werden. Die strömungstechnische Reinigung zeigte im Gegensatz zu den anderen Verfahren nur eine teilweise Abreinigung.

Für den praktischen Einsatz sollte ein Wärmeübertrager so konstruiert werden, dass in regelmäßigen Abständen eine vollständige Abreinigung des Biofilms erfolgt.

Bei der Dimensionierung des Wärmeübertragers aus Edelstahl sollte davon ausgegangen werden, dass sich in einem Zeitraum von ca. 90 Tagen eine Wärmeübertragungsmindernde Schicht mit einem Wärmedurchgangswiderstand von  $0,0012 \text{ (m}^2\text{K)/W}$  auf dem Wärmeübertrager bildet. Nach der Betrachtung der Versuchsreihen scheint sich nach dieser Zeit das Biofilmwachstum in einer Plateauphase zu befinden. Wenn keine strömungstechnische Reinigung vorgesehen wird, sollte der Wärmeübertrager so konstruiert werden, dass in regelmäßigen Abständen eine mechanische, manuelle oder eine Abreinigung durch Hochdruck realisieren lässt.

## 7 Planungsgrundlagen für die Konstruktion von Wärmeübertragern

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Dezentrale Wärmerückgewinnung aus häuslichem Abwasser“ (SF-10.08.18.7-10.4) wurde gezeigt, dass die Energiemenge des Abwassers ausreicht, um das gesamte Trinkwarmwasser eines Gebäudes mit Hilfe einer Wärmepumpe zu erwärmen.<sup>73</sup> Ein mögliches Anlagenkonzept ist in Abbildung 60 dargestellt. Das im Gebäude anfallende Abwasser wird in einem zentralen Abwasserspeicher gesammelt. Aus diesem Abwasserspeicher wird das Abwasser durch einen Gegenstromwärmeübertrager geleitet, der analog zu dem im Versuchsstand konzipierten Wärmeübertrager konstruiert wird. Dieser Wärmeübertrager entzieht dem Abwasser die Energie und stellt die Energie einer Wärmepumpe zur Verfügung. Die Wärmepumpe hebt diese Energie unter dem Einsatz von elektrischer Energie auf ein höheres Temperaturniveau und gibt die Energie an den Trinkwarmwasserspeicher ab. Über die im Gebäude liegenden Trinkwarmwasserleitungen wird das Trinkwarmwasser zu den Verbrauchern geführt.

---

<sup>73</sup> Vgl. Beyert, Joachim; Brunk, Marten F.; Osebold, Rainard; Seybold, Christopher; Vosen, Georg: Dezentrale Wärmerückgewinnung aus häuslichem Abwasser. Endbericht der RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Baubetrieb und Gebäudetechnik im Forschungsprogramm Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesministeriums für Verkehr, Bau, Stadtentwicklung, Aktenzeichen: SF-10.08.18.7-10.4/ II 3 F20-09-1-250. Aachen, 2012.

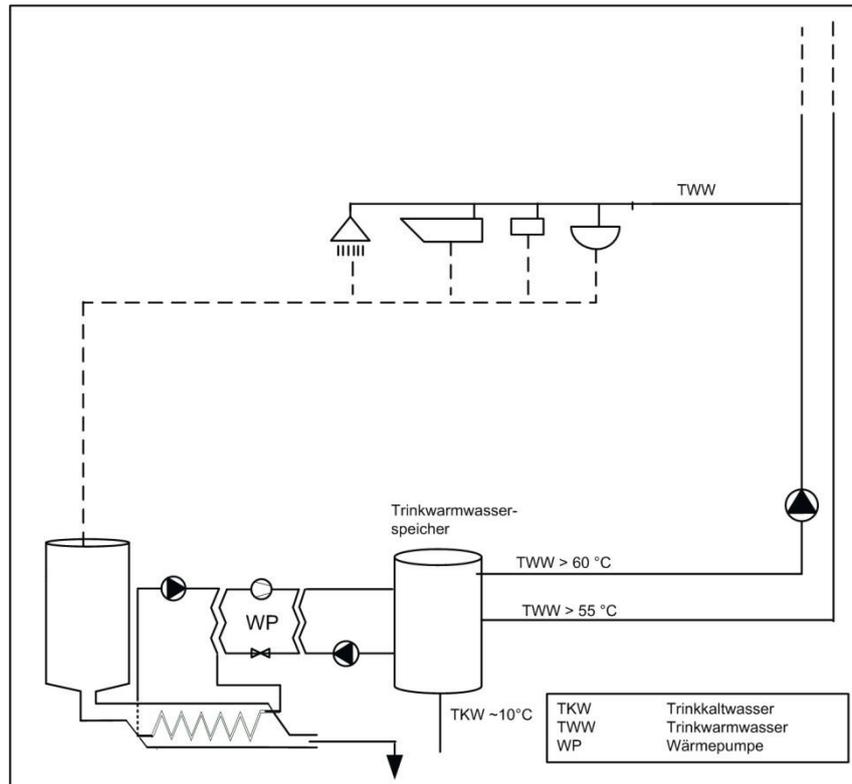


Abbildung 60: Mögliches Anlagenkonzept zur Abwasserwärmerückgewinnung zur Trinkwassererwärmung<sup>74</sup>

Ein Problem dieser Konstruktion ist der in diesem Forschungsvorhaben untersuchte, sich auf den Wärmeübertragern bildende Biofilm. Grundsätzlich lässt sich der wärmeübertragsmindernden Biofilmbildung auf zwei Arten entgegenwirken. Zum einen lässt sich der Wärmeübertrag durch eine regelmäßige Reinigung des Wärmeübertragers verbessern, zum anderen kann man die Biofilmbildung bei der Auslegung des Wärmeübertragers berücksichtigen und den Wärmeübertrager entsprechend größer dimensionieren. Um ein Optimum zwischen Wärmeübertragervergrößerung und strömungstechnischer Abreinigung zu bestimmen, wurden dynamische Simulationen mit Matlab/ Simulink durchgeführt. Die Simulationsmodelle, die entsprechenden Annahmen sowie die entsprechenden Auswertungen sind sehr umfangreich und werden ausführlich in Vogt, A. 2017 beschrieben.<sup>75</sup>

<sup>74</sup> Vgl. Vogt, A. 2017

<sup>75</sup> Vgl. Vogt, A. 2017

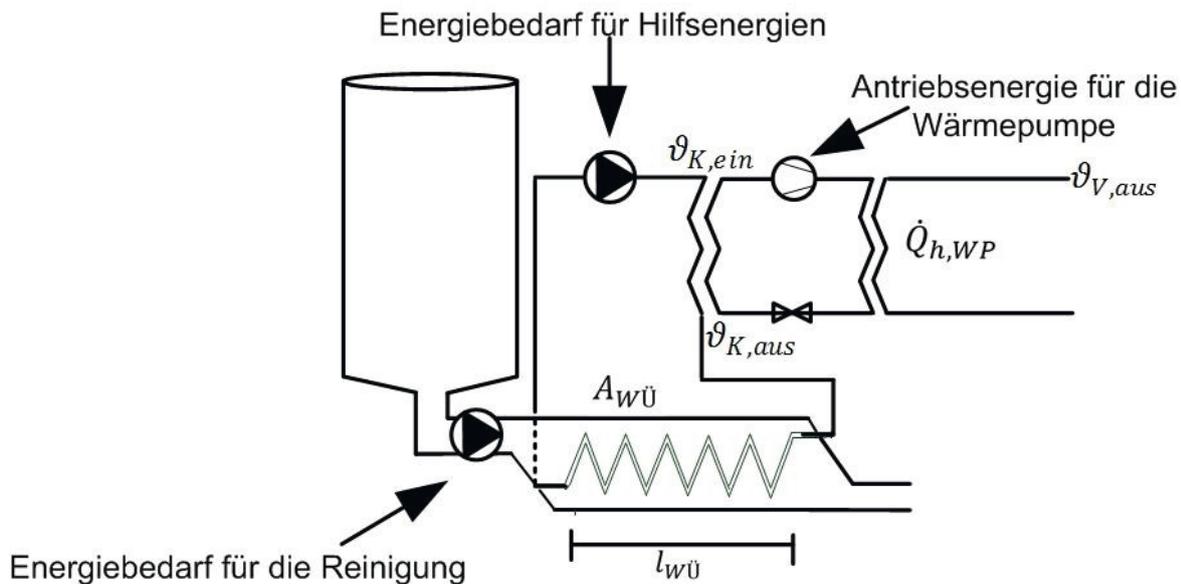


Abbildung 61: Simulationsgrundlage für die Optimierung<sup>76</sup>

Abbildung 61 zeigt die Simulationsgrundlage für diese Optimierung. Betrachtet wurden die Hilfsenergien für die Zirkulation, die Hilfsenergien für die Reinigung und die Antriebsenergie für die Wärmepumpe unter einer Variation der Wärmeübertragerfläche und des Reinigungszyklus mittels strömungstechnischer Reinigung analog zum Versuchsstand. Bei einer Verbesserung des Wärmeübertrags durch eine Vergrößerung des Wärmeübertragers oder einer Erhöhung der Reinigungshäufigkeit verringert sich die benötigte elektrische Antriebsenergie der Wärmepumpe. Gleichzeitig geht mit einer Vergrößerung des Wärmeübertragers eine erhöhte Hilfsenergie für die Umwälzung und mit einer häufigeren Reinigung ein erhöhter Energiebedarf für die strömungstechnische Reinigung einher. Es handelt sich somit um ein 2-Dimensionales Optimierungsproblem, das analytisch in Vogt, A. 2017 gelöst wurde.<sup>77</sup>

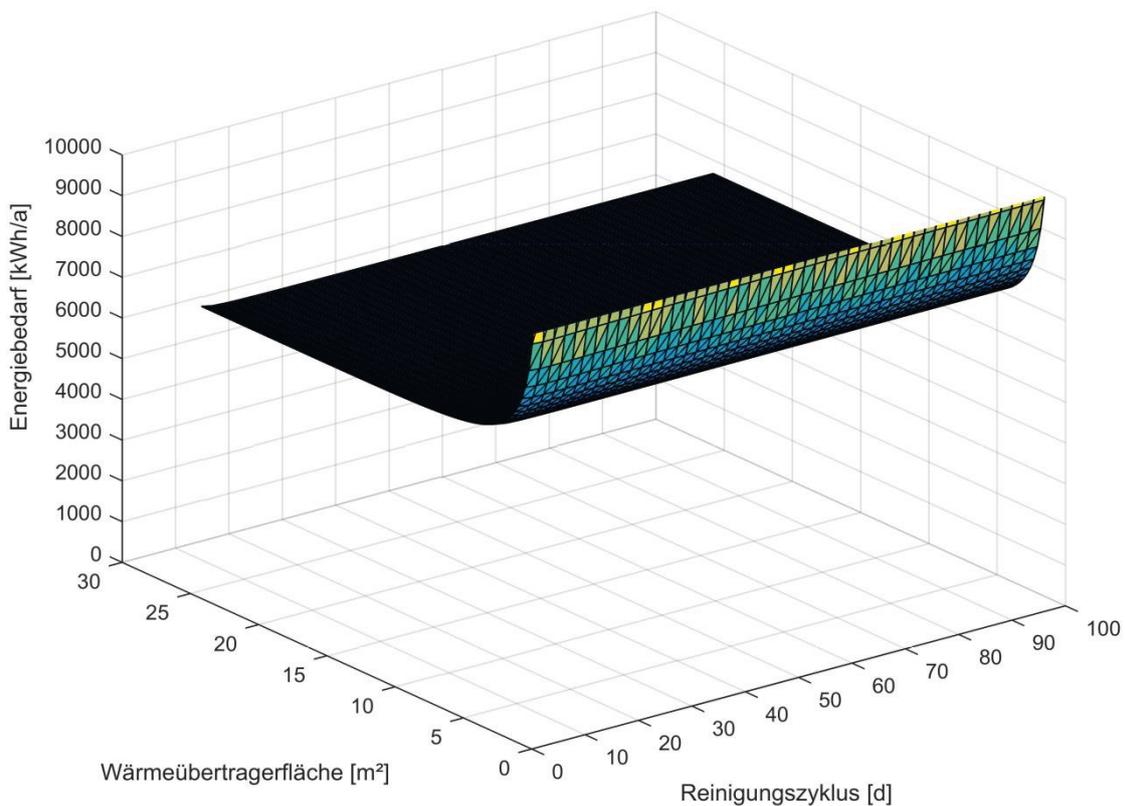
### 7.1 Energetische Optimierung des Wärmeübertragers

Abbildung 62 zeigt die energetische Auswertung für dieses Optimierungsproblem. Dargestellt ist der elektrische Energiebedarf in Abhängigkeit der Wärmeübertragerfläche und des Reinigungsintervalls. Diese Optimierung wurde exemplarisch für ein Gebäude mit 8 Wohneinheiten und 28 Nutzern durchgeführt. Die Wärmepumpe wird mit einer Heizleistung von 10,5 kW im Auslegungspunkt betrieben. Die detaillierte

<sup>76</sup> Vgl. Vogt, A. 2017

<sup>77</sup> Vgl. Vogt, A. 2017

Auslegung sowie die weiteren Dimensionierungsparameter des Systems sind in Vogt, A. 2017 dargestellt.



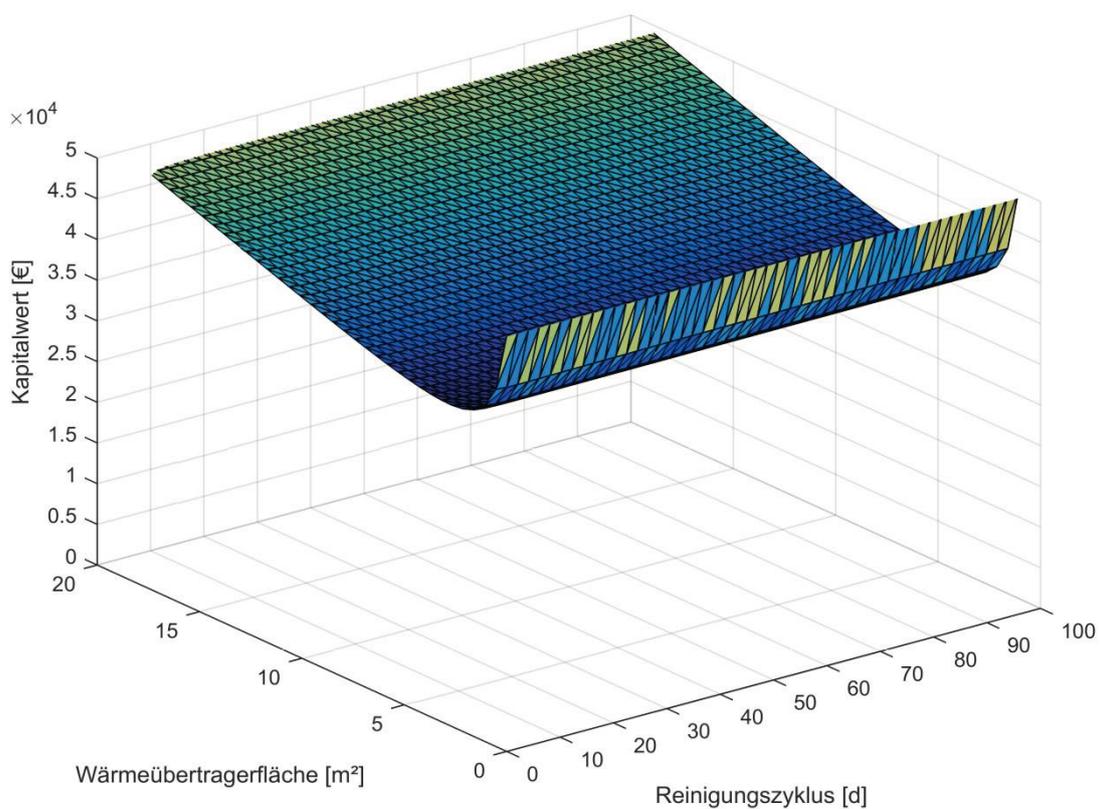
**Abbildung 62:** Energiebedarf in Abhängigkeit der Wärmeübertragerfläche und des Reinigungszyklus<sup>78</sup>

Es zeigt sich, dass eine Vergrößerung der Wärmeübertragerfläche einen deutlichen Einfluss auf die Systemeffizienz hat. Die Strömungstechnische Reinigung hat einen wesentlich geringeren Einfluss. Das Optimum dieser energetischen Optimierung findet sich an den Rändern, bei einer Wärmeübertragergröße von 30 m<sup>2</sup> und einem Reinigungszyklus von 100 Tagen. Bei kleineren Wärmeübertragergrößen ist ein geringerer Reinigungszyklus optimal. Aus energetischer Sicht ist es sinnvoll, den Wärmeübertrager möglichst groß zu wählen. In der Praxis muss dies in der Regel über eine ökonomische Bewertung durchgeführt werden.

<sup>78</sup> Vgl. Vogt, A. 2017

## 7.2 Ökonomische Optimierung des Wärmeübertragers

Weiterhin wurde eine ökonomische Optimierung durchgeführt. Hierzu wurden die Erstinvestitionen sowie die verbrauchsgebundenen Kosten über einen Zeitraum von 20 Jahren bilanziert und es wurde der Kapitalwert über den gesamten Betrachtungszeitraum summiert. Die dieser Optimierung zu Grunde liegenden Kosten und Zinsannahmen sind in Vogt, A. 2017 detailliert dargestellt.

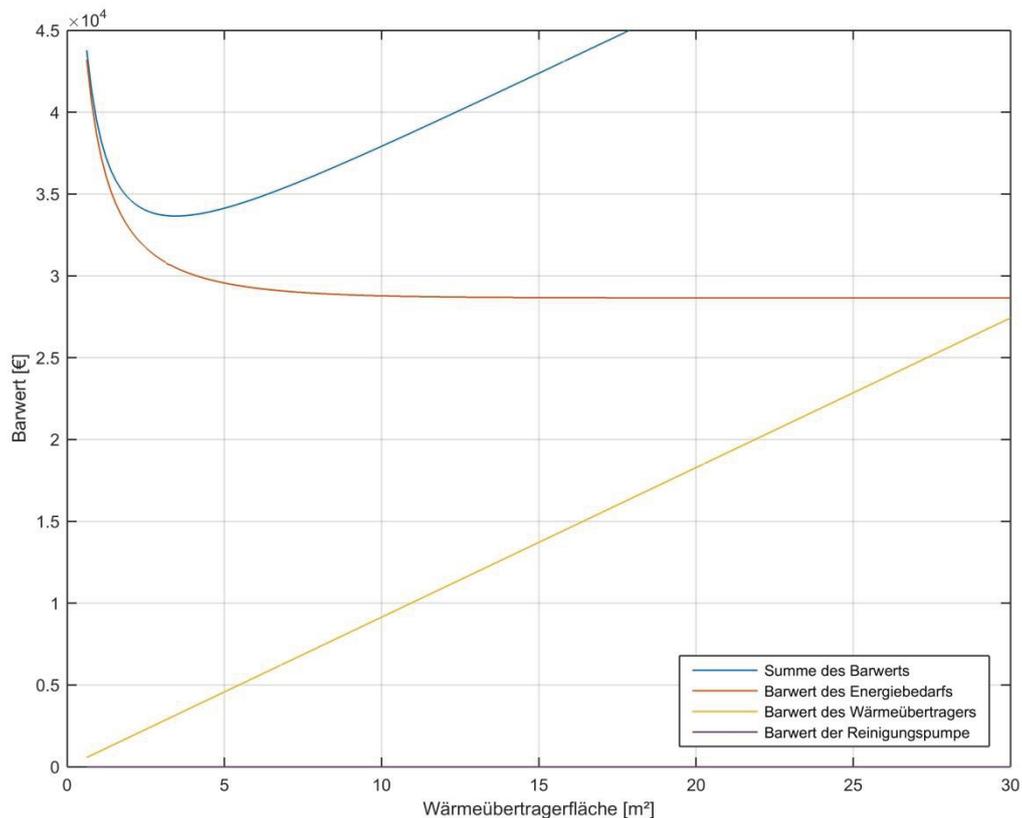


**Abbildung 63:** Kapitalwert in Abhängigkeit der Wärmeübertragerfläche und des Reinigungszyklus<sup>79</sup>

Abbildung 63 zeigt den Kapitalwert in Abhängigkeit der Wärmeübertragerfläche und des Reinigungszyklus. Hierbei findet sich ein klares Optimum bei einer Wärmeübertragerfläche von 3,35 m<sup>2</sup> und einer strömungstechnischen Reinigung nach 12,4 Tagen. Auch in diesem System reagiert der Kapitalwert deutlich sensibler auf eine Variation der Wärmeübertragerfläche, als auf eine Variation des Reinigungszyklus.

<sup>79</sup> Vgl. Vogt, A. 2017

In Vogt, A. 2017 wird weiterhin dargestellt, dass die Reinigung des Wärmeübertragers einen so geringen Einfluss hat, dass die Kosten der Erstinvestition für die Implementierung einer Reinigungsmöglichkeit deutlich nicht amortisiert werden kann. Daher wird empfohlen den Wärmeübertrager in regelmäßigen Abständen, bspw. 1-mal pro Jahr, unter Einsatz eines Hochdruckreinigers oder manuell zu reinigen.



**Abbildung 64:** Optimierung der Wärmeübertragerfläche ohne Reinigungsmöglichkeit<sup>80</sup>

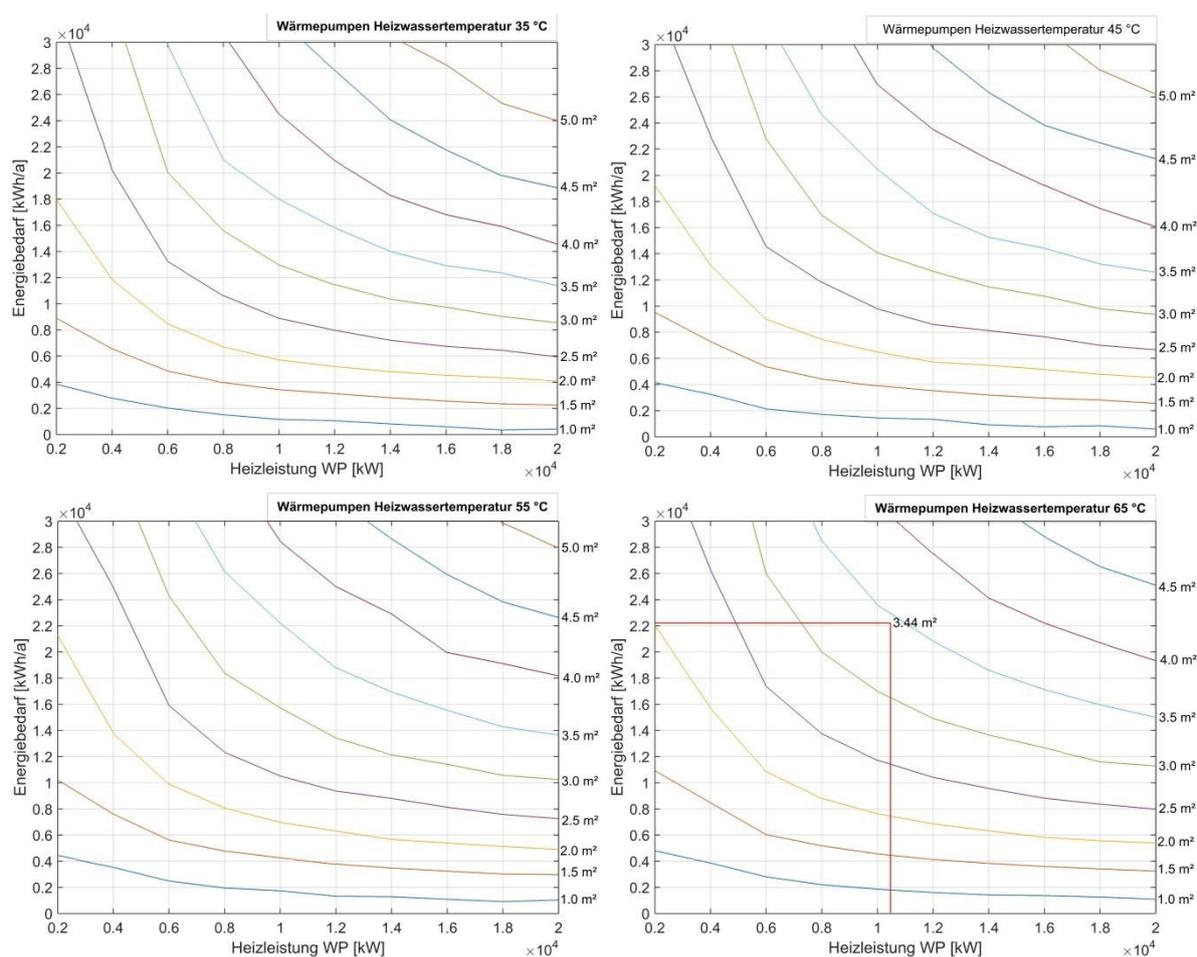
Unter dieser Prämisse ergibt sich für das System eine neue Optimierung, die in Abbildung 64 dargestellt ist. Es zeigt sich, dass eine anfängliche Vergrößerung der Wärmeübertragerfläche zu einer Verringerung der Kosten, die für den Energiebedarf anfallen, führt. Dadurch sinkt die Summe der Barwerte. Anschließend überwiegen die Kosten für eine weitere Vergrößerung die Kostenreduktion für die Energieeinsparungen. Das Optimum liegt bei einer Wärmeübertragerfläche von 3,44 m<sup>2</sup>.

<sup>80</sup> Vgl. Vogt, A. 2017

### 7.3 Planungsempfehlung für den Abwasserwärmeübertrager

Die Dimensionierung des Wärmeübertragers hängt stark von dem gewählten System ab. Die wesentlichen Einflussfaktoren sind der Energiebedarf des Systems, die Heizleistung der Wärmepumpe und die Heizwassertemperatur der Wärmepumpe.

Als Grundlage für eine Dimensionierung des Wärmeübertragers wurde die dargestellte kapitalwertorientierte Optimierung unter einer Variation der Wärmepumpenheizwassertemperatur, des jährlichen Energiebedarfs sowie der Heizleistung der Wärmepumpe durchgeführt.



**Abbildung 65:** Planungsempfehlungen für Wärmeübertrager

Abbildung 65 zeigt die Ergebnisse dieser mehrdimensionalen Optimierung. Nach Wahl der entsprechenden Parameter kann hier die kapitalwertoptimale Wärmeübertragerfläche abgelesen werden. Exemplarisch ergibt sich für das vorgestellte System bei einem Energiebedarf von 22.600 kWh/a, einer Wärmepumpenheizleistung von

10,5 kW sowie einer Heizwassertemperatur der Wärmepumpe von 65 °C eine Wärmeübertragerfläche von 3,44 m<sup>2</sup>.

## 8 Fazit

### 8.1 Zusammenfassung der Forschungsarbeiten

Durch den konstruierten Versuchsstand konnten verlässliche Wärmedurchgangswiderstände für Biofilme auf Abwasserwärmeübertragern im Zeitverlauf ermittelt werden. Dabei kamen die drei Materialien Kupfer, Edelstahl und PTFE zum Einsatz. Die Versuche wurden mit vorgeklärtem und ungeklärtem kommunalem Abwasser durchgeführt. Bei dem Edelstahlwärmeübertrager lag der gemessene Wärmedurchgangswiderstand durch Biofilm bei ungeklärtem Abwasser am Ende der Versuchsreihe in Abhängigkeit des Volumenstroms zwischen 0,00083 (m<sup>2</sup>K)/W und 0,00112 (m<sup>2</sup>K)/W. Bei vorgeklärtem Abwasser lag dieser zwischen 0,00075 und 0,001 (m<sup>2</sup>K)/W. Bei dem Kupferwärmeübertrager lag der Wärmedurchgangswiderstand bei ungeklärtem Abwasser am Ende der Versuchsreihe zwischen 0,00048 (m<sup>2</sup>K)/W und 0,00081 (m<sup>2</sup>K)/W. Bei vorgeklärtem Abwasser lag dieser zwischen 0,00049 und 0,00075 (m<sup>2</sup>K)/W. Bei dem PTFE-Wärmeübertrager lag der Wert für ungeklärtes Abwasser bei 0,0006 (m<sup>2</sup>K)/W und bei vorgeklärtem Abwasser bei 0,00103 (m<sup>2</sup>K)/W. Der Messfehler bei dem PTFE Wärmeübertrager ist allerdings sehr hoch einzuschätzen.

Es zeigt sich somit, dass das Biofilmwachstum auf dem Kupfer-Wärmeübertrager deutlich langsamer verläuft als auf den Vergleichswärmeübertragern. Allerdings zeigt sich ein deutlicher Angriff auf das Material des Kupferwärmeübertragers.

Um diese Wärmedurchgangswiderstände zu reduzieren bzw. den Biofilm vollständig zu entfernen, wurden unterschiedliche Reinigungsverfahren untersucht. Dabei erwies sich eine On-Stream-Reinigung durch Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit bei allen betrachteten Wärmeübertrageroberflächen als wirksam und erreicht eine Verringerung des Wärmedurchgangswiderstandes.

Mittels Off-Stream-Reinigungsverfahren wurde eine nahezu vollständige Wiedererlangung des ursprünglichen, sauberen Zustands für die Materialien Edelstahl und PTFE erreicht und es konnte keine Beeinflussung des Materials festgestellt werden. Die Oberfläche des Übertragermaterials Kupfer wurde innerhalb der Versuchsreihe durch das Abwasser angegriffen und wies nach Abschluss der Reinigung eine erhöhte Rauheit auf. Es wurde gezeigt, dass eine regelmäßige Reinigung des Wärmeübertragers aus ökonomischer Sicht zu keinen optimalen Ergebnissen führt. Einem Biofilmwachstum sollte auf Grundlage der hier veröffentlichten Wärmeübergangswiderstände durch eine entsprechende Dimensionierung des Wärmeübertragers entge-

gengewirkt werden. Eine entsprechende Dimensionierungshilfe wurde dargestellt. Grundsätzlich handelt es sich bei Wärmepumpenanlagen um komplexe individuelle Anlagen. Hierbei kann keine abschließende Empfehlung für ein entsprechendes Reinigungsverfahren oder eine Dimensionierung durchgeführt werden. Je nach Anlagentyp kann auch eines der vorgestellten chemischen, strömungstechnischen oder mechanischen Verfahren deutliche Vorteile aufzeigen.

## **8.2 Weiterer Forschungsbedarf**

Es wurde in mehreren Forschungsvorhaben das energetische Potential von Abwasser sowohl messtechnisch als auch am Versuchsstand gezeigt. Weiterhin wurden numerische Simulationen durchgeführt, die ebenfalls eine energetische Vorteilhaftigkeit und ökonomische Machbarkeit aufzeigen. Im weiteren Forschungsverlauf sollte eine Pilotanlage in ein Wohngebäude eingebaut und intensiv untersucht und vermessen werden. Hierdurch könnten auch die hier veröffentlichten Messwerte für das Biofilmwachstum untermauert werden. Essentiell für den flächendeckenden Einsatz der dezentralen Wärmerückgewinnung aus Abwasser ist es zu zeigen, dass Anlagen gebaut werden können, die wartungsarm sind und auch unter ökonomischen Bedingungen einen störungsfreien Betrieb der Heizungs- bzw. Trinkwarmwasseranlage gewährleisten.

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mehrfamilienhaus in Düren, Abwasserganglinie, werktags.....	3
Abbildung 2: Temperaturverlauf beim Wärmedurchgang durch eine ebene Wand ....	7
Abbildung 3 : Temperaturverlauf längs eines Gleichstrom- und Gegenstromwärmeübertragers .....	8
Abbildung 4 : Skizze eines Rohrwendel-Wärmeübertragers.....	9
Abbildung 5 : Skizze eines Rohrbündel-Wärmeübertragers .....	10
Abbildung 6: Relativer Verlauf der Wärmeübertragerleistung .....	11
Abbildung 7 : Entwicklung und Ausbreitung eines Biofilms in einem Wassersystem .....	12
Abbildung 8 : Zeitlicher Verlauf des Biofilmwachstums, $\Delta$ = Dicke des Biofilms .....	13
Abbildung 9: Grobübersicht Versuchsstand.....	21
Abbildung 10: Gesamtübersicht Versuchsstand .....	23
Abbildung 11 : Versuchsstand auf dem RWTH-Gelände .....	24
Abbildung 12 : Schematische Darstellung des Versuchsstands .....	24
Abbildung 13: Skizze Wärmeübertrager .....	26
Abbildung 14: Verwendete Wärmeübertrager in Kupfer und Edelstahl.....	27
Abbildung 15 : Bau des 1,7-PTFE-Rohrbündel-Wärmeübertragers .....	28
Abbildung 16: Thermostat für die Kaltwasserführung .....	30
Abbildung 17: Schema der verwendeten Kaltwasserführung .....	30
Abbildung 18 : IBC mit schematischer Darstellung der Anordnung von Quirl und Heizstab .....	32
Abbildung 19: Heizstab mit Bedieneinheit .....	32
Abbildung 20: Abwassertransport von der Kläranlage .....	33
Abbildung 21: PT1000 Platinwiderstandstemperatursensoren .....	34
Abbildung 22: Ennovatis Smartbox Datenlogger .....	35
Abbildung 23: Verlauf des systematischen Messfehlers.....	36
Abbildung 24: Temperaturmessung in dem Klarwasserstrom .....	37
Abbildung 25: Einbringung der Temperaturfühler in den Klarwasserstrom.....	38
Abbildung 26: Einbringung der Temperaturfühler im Abwasserstrom.....	39

---

Abbildung 27 : MID für die Kühlwassermessung (li.) und die Heizwassermessung (re.) .....	40
Abbildung 28: Abwassereingangstemperaturen .....	41
Abbildung 29: Gemessener und Berechneter Wärmeübergangskoeffizient .....	42
Abbildung 30: Äußerer Wärmeübergangswiderstand .....	43
Abbildung 31: Anordnung der Temperatursensoren über die Längsseite des Rohres .....	43
Abbildung 32: Temperaturverläufe des Abwassers bei einem Durchfluss von 8 l/min .....	44
Abbildung 33: Leistungsbilanz für verschiedenen Durchflüsse .....	45
Abbildung 34 : Zeitlicher Verlauf der Messung und Erreichung des quasi stationären Zustands für einen Wärmeübertrager aus Edelstahl .....	47
Abbildung 35: Prinzip der Versuchsdurchführung .....	50
Abbildung 36: Verschmutzung des Edelstahlwärmeübertragers .....	51
Abbildung 37: Wärmeübertragerleistung des Edelstahlwärmeübertragers bei ungeklärtem Abwasser .....	52
Abbildung 38: Wärmedurchlasswiderstand des Biofilms auf dem Edelstahlwärmeübertrager bei ungeklärtem Abwasser .....	53
Abbildung 39: Wärmeübertragerleistung des Edelstahlwärmeübertragers bei vorgeklärtem Abwasser .....	54
Abbildung 40: Wärmedurchlasswiderstand des Biofilms auf dem Edelstahlwärmeübertrager bei vorgeklärtem Abwasser .....	55
Abbildung 41: Wärmeübertragerleistung des Kupferwärmeübertragers bei ungeklärtem Abwasser .....	56
Abbildung 42: Wärmedurchlasswiderstand des Biofilms auf dem Kupferwärmeübertrager bei ungeklärtem Abwasser .....	57
Abbildung 43: Wärmeübertragerleistung des Kupferwärmeübertragers bei vorgeklärtem Abwasser .....	58
Abbildung 44: Wärmedurchlasswiderstand des Biofilms auf dem Kupferwärmeübertrager bei vorgeklärtem Abwasser .....	59
Abbildung 45 : Zeitlicher Verlauf des Biofilmwachstums auf dem PTFE-Wärmeübertrager .....	59
Abbildung 46: Wärmeübertragerleistung des PTFE-Wärmeübertragers bei ungeklärtem Abwasser .....	60

---

Abbildung 47: Wärmedurchlasswiderstand des Biofilms auf dem PTFE-Wärmeübertrager bei ungeklärtem Abwasser .....	61
Abbildung 48: Wärmeübertragerleistung des PTFE-Wärmeübertragers bei vorgeklärtem Abwasser .....	62
Abbildung 49: Wärmedurchlasswiderstand des Biofilms auf dem PTFE-Wärmeübertrager bei vorgeklärtem Abwasser .....	63
Abbildung 50: Wärmeübergangswiderstände durch Biofilme in verschiedenen Medien .....	65
Abbildung 51: Exemplarischer Temperaturverlauf am Wärmeübertrager .....	66
Abbildung 52: Wärmeübergangswiderstand des Biofilms .....	71
Abbildung 53: Detaillierte Darstellung der strömungstechnischen Abreinigung des Biofilms bei ungeklärtem Abwasser .....	72
Abbildung 54: Detaillierte Darstellung der strömungstechnischen Abreinigung des Biofilms bei vorgeklärtem Abwasser .....	73
Abbildung 55 : Foto der Wärmeübertrager PTFE, Kupfer und Edelstahl nach dem Ausbau .....	74
Abbildung 56 : Mechanische Reinigung des Edelstahl-Rohrwendel-Wärmeübertragers .....	75
Abbildung 57 : Mechanische Reinigung des Kupfer-Rohrwendel-Wärmeübertragers .....	76
Abbildung 58 : Kupfer-Rohrwendel-Wärmeübertrager nach der Reinigung ....	77
Abbildung 59 : Mechanische Reinigung des 1,7-PTFE-Wärmeübertragers ....	79
Abbildung 60: Mögliches Anlagenkonzept zur Abwasserwärmerückgewinnung zur Trinkwassererwärmung .....	82
Abbildung 61: Simulationsgrundlage für die Optimierung .....	83
Abbildung 62: Energiebedarf in Abhängigkeit der Wärmeübertragerfläche und des Reinigungszyklus.....	84
Abbildung 63: Kapitalwert in Abhängigkeit der Wärmeübertragerfläche und des Reinigungszyklus.....	85
Abbildung 64: Optimierung der Wärmeübertragerfläche ohne Reinigungsmöglichkeit .....	86
Abbildung 65: Planungsempfehlungen für Wärmeübertrager .....	87

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auszug der TEMA Fouling-Widerstände für Wasser und andere Fluide in $(\text{m}^2 \text{K})/\text{W}$ .....	16
Tabelle 2: Wärmeübergangswiderstände der Wärmeübertrager bei einem Kühl-Klarwasservolumenstrom von 16 l/min .....	50
<b>Tabelle 3:</b> Übersicht über Wärmeübertragungsminderung auf den verschiedenen Wärmeübertragern .....	64
Tabelle 4: Exemplarische Übertragung der Wärmedurchgangswiderstände auf andere Wärmeübertragertypen.....	67

---

## Literaturverzeichnis

**ATV-DVWK - Deutsche Vereinigung f. Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e. V.** : Indirekteinleitungen nicht häuslichen Abwassers; 1. Auflage, ATV-DVWK-Regelwerk M, 115,3; Hennef; August 2004.

**Bernstein, Herbert. 2014.** Messelektronik und Sensoren: Grundlagen der Messtechnik, Sensoren, analoge und digitale Signalverarbeitung. 1. Auflage. Springer Vieweg Wiesbaden 2014

**Birkenhauer, E.; Neethirajan, S.:** Prevention and Control of Biofilms in the Food Industry and Bio-Nanotechnology Approaches. In: Biofilms in the Food Environment. 2. Auflage. New York: John Wiley & Sons, 2015.

**Brunk, F. M. ; Seybold, C. ; Vogt, A. :** Intelligente Wärmepumpensysteme zur Trinkwassererwärmung durch Abwasserwärmerückgewinnung. In: BTGA Almanach; 2013, 56–59.

**Bundesamt für Energie (BFE), Wanner, O.** Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen, Dübendorf 2004.

**Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hrsg.):** Primärenergieverbrauch in Deutschland, 2010.

**Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (Hrsg.):** Auswirkungen des Klimawandels und des demografischen Wandels auf die Wasserwirtschaft, 2010.

**Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (Hrsg.):** Abwasserdaten Deutschland – Zahlen und Fakten der Abwasserentsorgung, Juni 2010.

**Bürschgens, A.; e.V., DIN :** Legionellen in Trinkwasser-Installationen : Gefährdungsanalyse und Sanierung. 1. Aufl.. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag, 2015.

**DIN 50929-3:1985-09,** Korrosion der Metalle – Teil 3 Korrosionswahrscheinlichkeit metallischer Werkstoffe bei äußerer Korrosionsbelastung - Rohrleitungen und Bauteile in Böden und Wässern.

**DIN EN 14868:2004-01,** Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe – Korrosionswahrscheinlichkeit in Wasserzirkulationssystemen.

**DVGW e.V. :** Technische Regel Arbeitsblatt W 270, Vermehrung von Mikroorganismen auf Werkstoffen für den Trinkwasserbereich – Prüfung und Bewertung; Bonn, November 2007.

---

**Eawag (Hrsg.)**, Wanner, O: Wärmerückgewinnung aus Abwasser, Schriftenreihe der Eawag Nr. 19, Dübendorf 2009.

**Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (Hrsg.)**: Biofilme vermindern die Wärmerückgewinnung, Eawag News 60d, Dezember 2005.

**Elmendorf, Wolfgang, Bohl, Willi. 2008.** Technische Strömungslehre: Stoffeigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen, Hydrostatik, Aerostatik, Inkompressible Strömungen, Kompressible Strömungen, Strömungsmesstechnik. 14. Auflage. Vogel Verlag Würzburg 2008.

**ennovatis GmbH** : ennovatis Smartbox Anleitung - Der Datensammler und Datenbote des ennovatis Energiemanagement-Systems, Juni 2008

**Flemming, Hans-Curt** : Biofouling bei Membranprozessen. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2013.

**Flemming, Hans-Curt ; Murthy, P. S. ; Venkatesan, R. ; Cooksey, K. E.** : Marine and Industrial Biofouling. Berlin Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2008.

**Flemming, Hans-Curt ; Schaule, G.** : Mikrobielle Werkstoffzerstörung - Biofilm und Biofouling, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, in: Werkstoffc und Korrosion, 1994.

**Flemming, Hans-Curt et al. (eds.)** : Biofilm Highlights, Springer Series on Biofilms 5, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.

**Fraunhofer IRB Verlag (Hrsg.)**: Christopher Seybold & Marten F. Brunk, Dezentrale Wärmerückgewinnung aus häuslichem Abwasser, 29.07.2013.

**FuehlerSysteme eNet International** : URL: <http://www.fuehlersysteme.de/kabeltemperaturfuehler-mit-silikon-leitung.html>: Zugriff am 27.07.2014.

**Gujer, Willi** : Siedlungswasserwirtschaft. 3. Aufl.. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2006.

**H. Hermann Ehlers GmbH** : MID\_M2000\_Datenblatt, MID\_M2000\_BA\_01\_1203 / Montage und Bedienungsanleitung, März 2012.

**H. Hermann Ehlers GmbH** : MID\_PrimoAdvanced\_Datenblatt, MID\_PrimoAdvanced\_Datenblatt\_0711, Juli 2011.

**Hahne, Erich** : Technische Thermodynamik : Einführung und Anwendung. völlig überarbeitete Auflage. München: Oldenbourg Verlag, 2010.

---

**Hunze, Michaela** : Simulation in der kommunalen Abwasserreinigung : Grundlagen, Hintergründe und Anwendungsfälle ; ein Lehrbuch für Anfänger und Fortgeschrittene; Oldenbourg Industrieverlag, München 2005.

**Imhoff, Karl ; Imhoff, Klaus R.** : Taschenbuch der Stadtentwässerung; 30. Auflage; Oldenbourg Industrieverlag; München 2007.

**Kistemann, Thomas ; Schulte, Werner ; Rudat, Klaus ; Hentschel, Wolfgang ; Häußermann, Daniel** : Gebäudetechnik für Trinkwasser : Fachgerecht planen - Rechtssicher ausschreiben - Nachhaltig sanieren. 1. Auflage, Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2012.

**Kronos International, INC** : Entfernung von H<sub>2</sub>S in Abwassersammlern, 2007.

**Maier, Hans Jürgen ; Niendorf, Thomas ; Bürgel, Ralf** : Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik : Grundlagen, Werkstoffbeanspruchungen, Hochtemperaturlegierungen und -beschichtungen. 5. Auflage. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2015.

**Marquardt, Kurt** : Rein- und Reinstwasseraufbereitung. 1. Aufl.. Renningen: expert verlag, 1994.

**Müller-Steinhagen, Hans** : Handbuch Wärmeübertrager-Reinigungssysteme. Verfahren zur Verminderung und Beseitigung von Ablagerungen und Verschmutzungen. Essen: Publico-Publ., 2001.

**Oldenbourg Industrieverlag (Hrsg.):** Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik, 2010.

**Parthier, Rainer (Hrsg.):** Messtechnik: Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure; 4. Auflage, Wiesbaden: Vieweg & Sohn-Verlag, 2008.

**Presse- und Informationsamt der Bundesregierung** : URL: <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/StatistischeSeiten/Breg/Energiekonzept/0-Buehne/ma%C3%9Fnahmen-im-ueberblick.htm>; Zugriff am 25.03.2016.

**Richtlinie VDI 2035** : Vermeidung von Schäden in Warmwasser-Heizungsanlagen – Blatt 2 - Heizwasserseitige Korrosion, Düsseldorf 2009.

**Roetzel, Wilfried ; Spang, Bernhard** : Analytisches Verfahren zur thermischen Berechnung mehrgängiger Rohrbündel-Wärmeübertrager; VDI-Verlag; Düsseldorf 1987.

**Schlünder, Ernst-Ulrich** : Transfer, International Centre for Heat and Mass: Heat Exchanger Design Handbook : Thermal and hydraulic design of heat exchangers. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1983.

---

**Shah, Ramesh K. ; Sekulic, Dusan P. :** Fundamentals of Heat Exchanger Design. 1. Auflage; New York: John Wiley & Sons, 2003.

**Spang, B. :** Wärmedurchgang und mittlere Temperaturdifferenz in Rekuperatoren; Habilitationsschrift, Universität der Bundeswehr Hamburg; Hamburg 1998.

**Stadt Hanau :** Abwassersatzung der Stadt Hanau: Stadtverordnetenbeschluss: 16.12.2003.

**TEMA INC. :** Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association, 6th Edition, New York, 1978.

**Thermo Fisher Scientific GmbH :** NESLAB ThermoFlex™ Datasheet, Product Specifications, 2009

**Verein Deutscher Ingenieure :** VDI Wärmeatlas, 10. Auflage, Springer Verlag, Berlin 2006.

**Verein Deutscher Ingenieure:** VDI-Wärmeatlas, 11. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2013.

**Verein deutscher Ingenieure (Hrsg.):** VDI 3512 Blatt 3, 2009.

**Vogt, A.:** Optimierung der gebäudeinternen Abwasserwärmerückgewinnung auf der Grundlage von Versuchsstandsmessungen und simulativen Systemvergleichen, Aachen, 2017.

**Wanner, O. :** Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen. Schlussbericht September 2004.

**Wolverine Tube. INC. :** Wieland-Werke AG Germany, Wolverine Engineering Data Book II, 2001.

**Zilch, Konrad ; Diederichs, Claus Jürgen ; Katzenbach, Rolf ; Beckmann, Klaus J. :** Handbuch für Bauingenieure : Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit. 2. Aufl.. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2013.

**Am Lehrstuhl abgeschlossene Abschlussarbeiten (nicht veröffentlicht) im relevanten Forschungsbereich:**

**Engel, B.;** Masterarbeit zum Thema: Simulatorische Untersuchung eines dezentralen Abwasserwärmepumpensystems (nicht veröffentlicht), RWTH- Aachen University, Lehrstuhl BGT, Aachen, 2013.

**Lantwin, M.;** Masterarbeit zum Thema: Versuchsaufbau sowie -durchführung zur Untersuchung und Optimierung des erreichbaren Wärmeübertrags aus Abwasserströmen (nicht veröffentlicht), RWTH- Aachen University, Aachen, 2014.

**Schuhmann, J.;** Masterarbeit zum Thema: Untersuchung und Optimierung eines Wärmeübertragersimulationsmodells (nicht veröffentlicht), RWTH- Aachen University, Aachen, 2015.

**Dissen, I.;** Bachelorarbeit zum Thema: Untersuchung und Vergleich der Nutzung des energetischen Potentials der Wärmequelle Abwasser (nicht veröffentlicht), RWTH- Aachen University, Aachen, 2015.

**Schüring, M.;** Masterarbeit zum Thema: Versuchsdurchführung und numerische Simulation von Wärmeübertragern unter dem Einfluss von Oberflächenverschmutzungen (nicht veröffentlicht), RWTH- Aachen University, Aachen, 2016.

**Walkembach, J.;** Bachelorarbeit zum Thema: Optimierung der Stationarität eines Versuchsstandes zur Ermittlung der Leistung eines Abwasserwärmeübertragers (nicht veröffentlicht), RWTH- Aachen University, Aachen, 2014.