

## **Abschlussbericht**

### **„Entwicklung eines allgemein nutzbaren Automatisierungssystems für Membranbelebungsanlagen“**

**(EnAM)**

**gerichtet an das**

**NRW.**



Ministerium für  
Umwelt und Naturschutz,  
Landwirtschaft und Verbraucherschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen

Gummersbach, den

**18. Juli 2013**

für den Antragssteller:

Prof. Dr.-Ing. Lothar Scheuer,  
Vorstand Aggerverband

# Inhaltsverzeichnis

<b>Verzeichnis der Tabellen</b> .....	VII
<b>Verzeichnis der Abkürzungen und der Symbole</b> .....	VIII
<b>Präambel</b> .....	X
<b>1 Veranlassung und Zielsetzung</b> .....	1
<b>2 Kenntnisstand</b> .....	3
2.1 Membranverfahren und Membranbelebungsanlagen .....	3
2.2 Leistungslimitierende Faktoren beim Membranbelebungsverfahren.....	10
2.2.1 Foulingverhalten von Niederdruckmembranen.....	12
2.2.2 Reversibles und irreversibles Fouling .....	14
2.3 Simulationsmodelle .....	14
<b>3 Beschreibungen, Untersuchungen und Ergebnisse der betrachteten Anlagen zur Modellentwicklung</b> .....	17
3.1 KA Seelscheid.....	17
3.1.1 Analyse der hydraulischen Bedingungen.....	19
3.1.2 Prozessregelung und -führung.....	27
3.2 Halbtechnische simas-Versuchsanlage .....	33
3.2.1 Dauerbetrieb mit Bemessungsflux und Variation des CF-Luftvolumenstromes .....	35
3.2.2 Dauerbetrieb mit halbem Bemessungsflux und Variation des CF-Luftvolumenstromes .....	36
3.2.3 Dauerbetrieb mit gangliniengesteuerten Flux und Variation des Luftvolumenstroms .....	37
3.2.4 Filtratabzug ohne Cross-Flow Luftvolumenstrom.....	39
3.2.5 Tracerversuch und Deckschichtablösung/ - austrag.....	40
3.3 KA Monheim .....	42
3.4 KA Konzen.....	45
3.5 KA Nordkanal.....	47

---

<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	49
4.1	Datenaufnahme, -verarbeitung und –auswertung.....	49
4.2	Mathematische Grundlagen und Aufbau des Simulationsmodells .....	51
4.2.1	Identifizierung der Einflussgrößen.....	51
4.2.2	Modellumgebung .....	58
4.3	Modellentwicklung.....	59
4.3.1	Das Simulationsmodell am Beispiel der KA Seelscheid .....	62
4.3.2	Simulationsmodell am Beispiel der simas-Anlage.....	64
4.3.3	Kalibrierung und Validierung der Modellparameter .....	65
4.4	Modellkalibrierung und -validierung .....	66
4.4.1	Plattenmembran .....	67
4.4.2	Hohlfasermembran .....	69
4.5	Aufbau einer modellbasierten Bedienerunterstützung und des Schulungssimulators .....	72
4.5.1	Modellumgebung .....	78
4.6	Web-Oberfläche zur Nutzung des Simulators.....	78
4.7	Optimierung der Prozessregelung.....	82
4.7.1	Dauerfiltration unter Variation der Zykluszeiten.....	84
4.7.2	Filtration eines typischen Tagesgangs im Frühjahr unter Variation der Zykluszeiten .....	86
4.7.3	Filtration einer Gesamt-Wassermenge unter Variation der Filtrationsmenge je Zyklus bei konstanten Zykluszeiten.....	87
4.8	Nutzung zu Schulungszwecken.....	89
4.9	Allgemeingültige Grundlagen für Automatisierungssysteme und Simulationsmodelle .....	90
4.9.1	Überwachung einer Membranbelebungsanlage.....	91
4.9.2	Automatisierter Betrieb einer Membranbelebungsanlage.....	93
<b>5</b>	<b>Fazit</b> .....	96
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	103

<b>Anhang</b> .....	107
---------------------	-----

## Verzeichnis der Bilder

Bild 2-1: Gegenüberstellung der Betriebsweisen Dead-End und Cross-Flow (MELIN und RAUTENBACH, 2007).....	4
Bild 2-2: Modulbauformen (MELIN und RAUTENBACH, 2007) .....	5
Bild 2-3: Anordnung der Membranen (Pinnekamp und Friedrich, 2006) .....	5
Bild 2-4: Funktionsprinzip und Modulkassette des ZeeWeedTM der Firma ZENON (links: schematische Darstellung des Funktionsprinzips; rechts: Foto der technischen Ausführung der Modulkassette) (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006).....	7
Bild 2-5: PURON-Modul und Modulbaustein (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006, 2006).....	8
Bild 2-6: Plattenmodul der Firma Kubota (links: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips; rechts: Foto der Anordnung der Plattenmodule als Plattenpaket) (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006) .....	9
Bild 2-7: Membranmodul der Martin Systems AG (links: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips; rechts: anschlussfähiges Modulpaket) (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006).....	10
Bild 2-8: Plattenmodul der Firma A3 GmbH (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006) .....	10
Bild 2-9: Permeabilitätsmindernde Faktoren beim Membranbelevungsverfahren (MUNLV, 2007) .....	11
Bild 2-10: Schematische Darstellung der Foulingmechanismen (a) Filterkuchen- oder Deckschichtbildung, (b) Porenverblockung, (c) Poreneinschnürung (CRITTENDEN et al., 2005) .....	12
Bild 2-11: Modellschema zur EPS-Bildung (WETT, 2005) .....	13
Bild 3-1: Fließschema der KA Seelscheid .....	17
Bild 3-2: Membranbiologie mit Gebläsezuordnung der KA Seelscheid .....	18
Bild 3-3: Skizze der Modulanordnung mit Messtechnik einer Membranstraße der KA Seelscheid.....	19
Bild 3-4: Membrankammern mit permeatseitigem Rohrleitungssystem der KA Scheelscheid.....	21

Bild 3-5:	Entwicklung des Druckverlusts über die jeweiligen Membranabschnitte.....	23
Bild 3-6:	Korrektur des Unterdruckes.....	24
Bild 3-7:	Ausschnitt Rohrleitungsisometrie .....	25
Bild 3-8:	Betriebsdiagramm für die Membranstraße MB 1 OL bei Vollastbetrieb.....	26
Bild 3-9:	Abhängigkeit der Flussrate von der Anzahl der Halbstraßen .....	28
Bild 3-10:	Spezifischer Energieverbrauch in den sechs Betriebsphasen, mit Mittelwert und mittlerer Abweichung als Maß für die Streuung der Daten.....	33
Bild 3-11:	SIMAS-Membranschulungsanlage (Kubota-Plattenmembran).....	34
Bild 3-12:	Variation des Luftvolumenstroms (Cross-Flow Belüftung) bei kontinuierlichem Filtratabzug (Bemessungsflux) des Versuchsabschnitts 1 ....	35
Bild 3-13:	Variation des Luftvolumenstroms (Cross-Flow-Belüftung) bei kontinuierlichem Filtratabzug (halber Bemessungsflux) des Versuchsabschnitts 2.....	37
Bild 3-14:	Variation des Luftvolumenstroms (Cross-Flow Belüftung) bei einem Filtratabzug nach Ganglinie (mittlere Flächenbelastung 6 l/m <sup>2</sup> h) des Versuchsabschnitts 3 .....	38
Bild 3-15:	Verblockte Membranplatten - Zwischenräume komplett mit Biomasse zugesetzt.....	40
Bild 3-16:	Rückspül- und Cross-Flow-Volumenstromversuche am Plexiglasmodul .....	41
Bild 3-17:	Fließschema der KA Monheim .....	43
Bild 3-18:	Permeabilität der Straße 2, ohne Berücksichtigung der Viskosität.....	44
Bild 3-19:	Permeabilitäten der Straße 2, auf 20 °C bezogen .....	44
Bild 3-20:	Fließschema der KA Konzen.....	46
Bild 3-21:	Fließschema von Belebungsbecken und Membrankammern der KA Konzen (Hübner und Rolfs, 2007) .....	46
Bild 3-22:	Fließschema der KA Nordkanal.....	47
Bild 3-23:	Fließschema des MBR in Nordkanal .....	48
Bild 4-1:	Aufbau der Feldbus-Ebene und die OPC-Anbindung .....	49
Bild 4-2:	Aufzeichnung der Messdaten in „GECO-C DB“ .....	50
Bild 4-3:	Darstellung des relevanten Gesamt- bzw. der einzelnen Teilprozesse der Abwasserreinigung und ihre Einflussgrößen .....	52

Bild 4-4:	Widerstandsmodell zur Formulierung des Deckschichtwiderstandes (Mulder, 1996).....	54
Bild 4-5:	Allgemein Simulationsmodell der Membranstufe .....	60
Bild 4-6:	Allgemeines Simulationsmodell der Membranstufe im Detail.....	61
Bild 4-7:	Aufbau des Simulationsmodells der Membrankläranlage Seelscheid (Biologie und Membranstraßen) .....	62
Bild 4-8:	Modell einer Membranstraße.....	63
Bild 4-9:	Modellierung der Biologie der KA Seelscheid.....	64
Bild 4-10:	Simulationsmodell der simas-Anlage.....	65
Bild 4-11:	Kalibrierung der Straße 1, Element oben links am 02.04.2010 .....	67
Bild 4-12:	Validierung Straße 3, Element rechts oben am 26.04.2010.....	68
Bild 4-13:	Kalibrierung der KA Nordkanal Straße 1 am 27.11.2009 .....	70
Bild 4-14:	Validierung der KA Nordkanal Straße 2 vom 12.01.2010 bis zum 13.01.2010.....	71
Bild 4-15:	Validierung KA Monheim Straße 4 von 2003 bis 2006.....	72
Bild 4-16:	Benutzeroberfläche des Membrankläranlagen-Simulators .....	75
Bild 4-17:	Menü des Modellblocks „Eingangsdaten der Membranbelebungsstufe“ .....	76
Bild 4-18:	Testlauf mit dem Membrankläranlagen-Simulator – Vergleich unterschiedlicher Belüftungswerte und Durchführung einer chemischen Reinigung.....	77
Bild 4-19:	Eingabeformular der Membrananlagendaten .....	80
Bild 4-20:	Messdaten zuordnen und zum Server senden .....	81
Bild 4-21:	Zielfunktion der Optimierungsprobleme.....	83
Bild 4-22:	Ergebnis der Dauerfiltration unter Variation der Zykluszeiten .....	85
Bild 4-23:	Auslastung der Membraneinheit „Links Oben“ der Membranstraße 1 der Membrankläranlage Seelscheid. Zeitraum: 05.03.2009–24.04.2009 .....	86
Bild 4-24:	Filtration eines Tagesgangs unter Variation der Zykluszeiten (Blick aus der Vogelperspektive auf das Optimierungsergebnis) .....	87
Bild 4-25:	Ergebnis des Optimierungsproblems: Filtration einer Gesamtwassermenge unter Variation der Filtrationsmenge je Zyklus bei konstanten Zykluszeiten.....	88

---

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 3-1:	Spezifische Luftmengen CF-Gebläse KA Seelscheid [ $\text{m}^3\text{N}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ].....	30
Tabelle 3-2:	Laufzeiten der intensiven Energieverbraucher (Auszug).....	32
Tabelle 3-3:	Luftvolumenstrom in Abhängigkeit der Gebläsefrequenz.....	34
Tabelle 4-1:	Modelltechnische Berücksichtigung der identifizierten Einflussgrößen .....	58
Tabelle 4-2:	Eingangsdaten des allgemeinen Simulationsmodells in Simulink .....	60
Tabelle 4-3:	Ausgangsdaten des allgemeinen Simulationsmodells in Simulink .....	61
Tabelle 4-4:	Ergebnisse der Kalibrierung und Validierung der KA Seelscheid.....	67
Tabelle 4-5:	Kalibrierungs- und Validierungsergebnisse der simas-Anlage .....	68
Tabelle 4-6:	Ergebnisse der Kalibrierung und Validierung der KA Konzen .....	69
Tabelle 4-7:	Kalibrierung und Validierung der KA Nordkanal.....	70
Tabelle 4-8:	Erforderliche Messdaten für die Kalibrierung .....	81
Tabelle 4-9:	Vorgaben zur Eigenüberwachung einer Membranbelebungsanlage.....	92

## Verzeichnis der Abkürzungen und der Symbole

Abkürzung/Symbol	Bezeichnung	Einheit
$Q_P$	Permeatvolumenstrom	l/s
$v_P$	Flux/spezifischer Fluss	l/(m <sup>2</sup> ·h)
$L_P$	Permeabilität	l/(m <sup>2</sup> ·h·bar)
TMP	transmembrane Druckdifferenz	bar
MF	Mikrofiltration	
UF	Ultrafiltration	
NF	Nanofiltration	
RO	Umkehrosmose	
CF	Cross-Flow	
TS	Trockensubstanzgehalt	g/l
CSB	chemischer Sauerstoffbedarf	mg O <sub>2</sub> /l
AOX	Adsorbierbare organische Kohlenwasserstoffe	
EPS	Extrazelluläre polymere Substanzen	
ASM	Activated Sludge Model	
RÜB	Regenüberlaufbecken	
NO <sub>3</sub> -N	Nitratstickstoff	
NH <sub>4</sub> -N	Ammoniumstickstoff	
m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	Normkubikmeter	
$\alpha$ SOTR	spezifischer Sauerstoffeintrag	kg O <sub>2</sub> /h
$\alpha$ SSOTR	spezifische Sauerstoffaufnahme	g O <sub>2</sub> /(m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ·m)
$\alpha$ SAE	Sauerstoffertrag	kg O <sub>2</sub> /kWh
Hz	Herz	1/s
KA	Kläranlage	
simas	Schulungsinstitut für Membrantechnik in der Abwasserreinigung in Seelscheid e.V.	
FU	Frequenzumformer	
MID	Magnetisch induktive Durchflussmessung	
EW	Einwohnerwert	E
E	Einwohner	
MBR	Membranbelebungsreaktor	
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.	
PO <sub>4</sub> -P	ortho-Phosphat	mg/l
P <sub>ges.</sub>	Gesamtphosphor	mg/l
NO <sub>2</sub> -N	Nitrit-Stickstoff	mg/l

---

IWA	International Water Association	
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung	
OPC	Object Linking and Embedding for Process Control	
PDV	Prozessdatenverarbeitungs-System	
ODBC	Open Database Connectivity	
SQL	Structured Query Language	
VPN	Virtual Private Network	
HRT	Hydraulische Verweilzeit	h
$B_{TS}$	Schlammbelastung	$g_{CSB}/g_{TS}$
$t_{TS}$	Schlammalter	d
$R_{ges.}$	Gesamtwiderstand	1/m
$R_M$	Membranwiderstand	1/m
$R_{DS}$	Deckschichtwiderstand	1/m
$R_F$	Foulingwiderstand	1/m
$\delta$	Membrandicke	m
$\varepsilon$	Membranporosität	-
$A_V$	volumenspezifische Oberfläche	$m^2/m^3$
$r_{DS}$	spez. Deckschichtwiderstand	1/(kg · m)
$k_r$	Relaxionskonstante	-
$k_p$	Pausenkonstante	-
$Q_{CF}$	Volumenstrom der Cross-Flow-Belüftung	$m^3_N/h$
$S_F$	Fouling-Konstante	1/m
$k_f$	Zeitkonstante Verblockung	$m^2/(m^3 \cdot s)$
$t_{CR}$	Zeitpunkt der chemischen Reinigung	
$\phi_c$	mittlerer Effizienzgrad der chemischen Reinigung	
$\mu$	Viskosität	$m^2/s$

## Präambel

Die Simulationstechnik als Teil der Planung und Optimierung technischer Anlagen und Verfahren ist weltweit auf breitem Vormarsch: Sie bringt dem Anwender einen deutlichen Zeit- und Kostenvorteil, verglichen mit klassischen Verfahren. In der Simulation lassen sich extrem schnell konstruktive Varianten vergleichen, dynamische Prozesse analysieren und optimieren, Risiken gefahrlos bewerten und somit komplette Anlagen auslegen und verbessern.

Nun sind Simulationen mechanischer Anlagen, wie z.B. Werkzeugmaschinen oder Roboter, schon länger Stand der Technik. Mechanische Prozesse sind schließlich gut und sehr exakt in Algorithmen abbildbar.

Komplexer wird es, wenn z.B. Fließvorgänge und stoffliche Transportvorgänge darzustellen sind. Die Simulation eines Nachklärbeckens ist schon nicht mehr in gleicher Genauigkeit möglich, wie bei mechanischen Systemen.

Wiederum erhöht sich die Schwierigkeit bei mehrphasigen Systemen, wo Transportvorgänge, Phasenübergänge und Diffusionsprozesse zu betrachten sind. Wir sind bei der Simulation des klassischen Belebungsbeckens angekommen, wo zusätzlich noch der biologische Abbau der Abwasserinhaltsstoffe zu berücksichtigen ist. Diese Simulation ist mit zahlreichen Ungenauigkeiten behaftet, verlangt umfassende anlagenspezifische Kalibration und ist erst seit wenigen Jahren Stand der Technik geworden.

Im Projekt EnAM stehen die Beteiligten vor einer zusätzlichen Schwelle: Neben Mehrphasigkeit und biologischen Abbauprozessen sind noch spezifische Grenzflächeneffekte in der Membran zu berücksichtigen. Damit wird die Simulation noch ein gutes Stück komplizierter.

Der erfolgreiche Abschluss des Projekts zeigt, dass die heutigen Simulationswerkzeuge in Verbindung mit moderner Rechnertechnik diese Aufgabenstellung bewältigen können. Die Simulationstechnik steht damit bereit, den Membranen in der Abwassertechnik einen Innovationsschub zu ermöglichen, wie es die CAD-Technik im Maschinenbau vor ca. 30 Jahren bewirkte.

# 1 Veranlassung und Zielsetzung

*„Die Membrantechnik zur Aufbereitung von Wasser und Abwasser zeigt eindrucksvoll, wie innovativ, zukunftsorientiert und ökonomisch sinnvoll Umweltschutz sein kann. In der 100-jährigen Geschichte der modernen Wasser- und Abwasseraufbereitung ... wurde noch keine Technik eingeführt, die solch vielfältig positive Effekte hat wie die der Membrantechnik. ... In der kommunalen Abwasserbehandlung werden bestimmte Typen von Membrananlagen, - die Biomembranfiltrationsanlagen (Membranbelebungsverfahren) – bislang noch selten eingesetzt. ....“ (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2003)*

Ziel der nordrheinwestfälischen Landesregierung Anfang der 2000er Jahre war es, die Membrantechnik in der kommunalen Abwasserbehandlung zu etablieren. So wurden in diesem Zeitraum vermehrt Anlagen projektiert und realisiert, die durch das Umweltministerium des Landes Nordrhein-Westfalen (NRW) gefördert wurden. Dazu gehörten auch die Kläranlage Seelscheid, die seit September 2004 mit dem Membranverfahren betrieben wird, sowie die simas-Schulungsanlage.

Mit den ersten Erfahrungen im großtechnischen Betrieb ergaben sich zahlreiche Aspekte und Fragestellungen, die sich auch bei anderen Anlagenbetreibern ergeben haben und nur im Rahmen eines Forschungsprojektes beleuchtet werden konnten. Die wesentlichen Motive lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Membranbelebungsanlagen besitzen eine höhere automatisierungs- und verfahrenstechnische Komplexität als konventionelle Kläranlagen und haben verfahrensbedingt einen höheren Energiebedarf. Daraus ergibt sich die Frage nach der optimalen Betriebsstrategie, die gut, sicher und wirtschaftlich zugleich sein soll.
- Um das Verfahren aus dem Stand der Wissenschaft in den Stand der Technik zu überführen, ist ein gezielter Wissenstransfer, insbesondere für das Betriebspersonal, unabdingbar.

Der Aggerverband als Fördermittelempfänger hat daraus gemeinsam mit den Projektpartnern das Forschungsprojekt EnAM - Entwicklung eines allgemein nutzbaren Automatisierungssystems für Membranbelebungsanlagen – initiiert. Hauptaugenmerk wurde auf die Entwicklung einer Simulationssoftware und eines Simulators gelegt, die als zielführende Instrumente sowohl für Optimierungs- als auch für Trainingszwecke dienen sollen.

Die wesentlichen Aufgaben, die in der Antragstellung des Projektes formuliert wurden, sind in der Reihenfolge der nachfolgenden Ergebnisdokumentation wie folgt:

- Entwicklung einer standardisierten Datenaufnahme, -verarbeitung und -auswertung zur Absicherung und besseren Vergleichbarkeit von Betriebsdaten

- Entwicklung eines mathematischen Modells zur Beschreibung und Optimierung von MBR-Anlagen
- Aufbau einer modellbasierten Bedienerunterstützung zur Optimierung der Betriebsstrategie (Simulator) mit Vereinfachung der Bedienerführung
- Entwicklung einer Web-Oberfläche zur Auswertung der Kalibrierung des Kläranlagensimulators
- Entwicklung einer optimalen Prozessregelung für Membranbelebungsreaktoren
- Nutzung des Simulationssystems zu Optimierungs- und Schulungszwecken
- Entwicklung eines umfassenden Automatisierungssystems für Membranbelebungsanlagen

## 2 Kenntnisstand

### 2.1 Membranverfahren und Membranbelebungsanlagen

Membranverfahren dienen der Stofftrennung. Sie arbeiten nach dem Prinzip eines Filters, erlauben jedoch je nach Art der Membranen eine Abtrennung von Partikeln bis zu molekularer Größe. Die abgetrennten Stoffe werden durch die Membran weder chemisch noch biologisch verändert. Die zu behandelnde Lösung (Feed) wird von der Membran in eine gereinigte Phase (Filtrat bzw. Permeat) und eine aufkonzentrierte Phase (Konzentrat bzw. Retentat) getrennt. Bei der Auswahl einer geeigneten Membran wird die minimal mögliche Porengröße neben der Zielvorgabe, welche Stoffe aus der wässrigen Lösung abgetrennt werden sollen, maßgeblich durch das Foulingpotential und die Verblockungseigenschaften der in der wässrigen Lösung enthaltenen Inhaltsstoffe beeinflusst.

#### Kenngrößen zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit

Zu den Grundbegriffen der Membrantechnologie gehören Fluss und Permeabilität. Unter Flux/spez. Fluss ( $v_P$ ) wird der Permeatfluss durch eine Membran unter stationären Verhältnissen verstanden. Hierbei wird der Permeatvolumenstrom ( $Q_P$ ) auf die Membranfläche ( $A$ ) und die Zeit bezogen, wie es in Gleichung 1 dargestellt ist (SCHRADER, 2007). Bei instationären Verhältnissen kann nur ein mittlerer Fluss angegeben werden. Für die Leistungsfähigkeit einer Membran ist der Fluss unter bestimmten Betriebsbedingungen von entscheidender Bedeutung.

$$v_P = \frac{Q_P}{A} \quad \left[ \frac{l}{m^2 h} \right] \quad \text{Gleichung 1}$$

Die Permeabilität ( $L_P$ ) beschreibt die Durchlässigkeit einer Membran. Sie wird ermittelt, indem der Fluss auf die transmembrane Druckdifferenz bezogen wird (Gleichung 2) (SCHRADER, 2007).

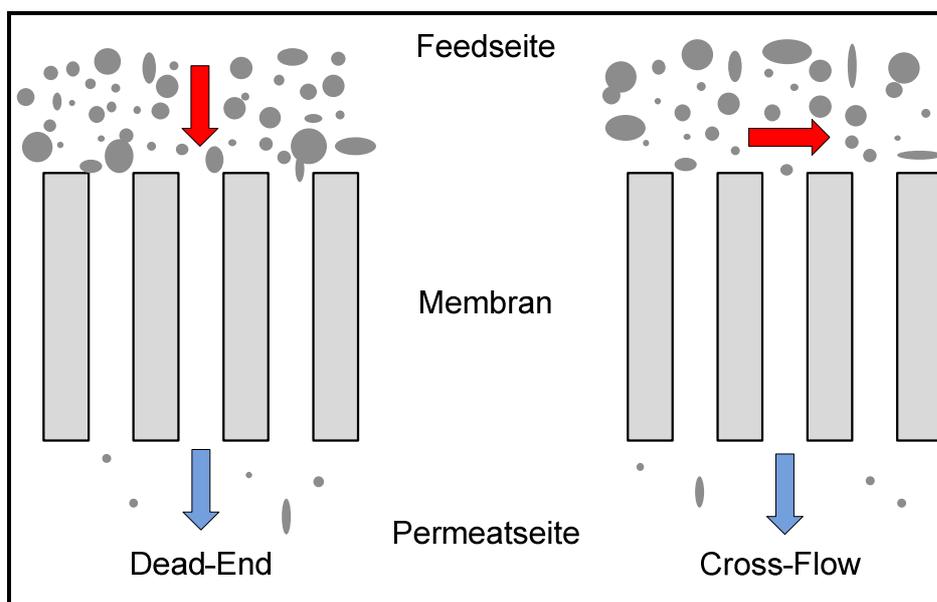
$$L_P = \frac{v_P}{\Delta p} \quad \left[ \frac{l}{m^2 h \text{ bar}} \right] \quad \text{Gleichung 2}$$

Die Permeabilität hängt vom Membranzustand ab und wird von der Abwasserzusammensetzung, der Temperatur und der Viskosität des Fluides beeinflusst. Inhaltsstoffe im Abwasser führen zu einem erhöhten Filtrationswiderstand, der die Permeabilität herabsetzt. Eine Erhöhung der Temperatur führt zu einem Anstieg der Permeabilität, was hauptsächlich mit einer geringeren Viskosität zusammenhängt (BERG, 2002).

#### Betriebsweisen

Bei der Prozessführung wird zwischen dem Dead-End-Betrieb und dem Cross-Flow-Betrieb

unterschieden. Nanofiltrations- (NF) und Umkehrosmosemembranen (RO) werden im Cross-Flow-Betrieb eingesetzt, während bei Mikrofiltration (MF) und Ultrafiltration (UF) auch der Dead-End-Betrieb möglich ist (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006). Beide Betriebsformen sind in Bild 2-1 dargestellt. Beim Cross-Flow-Betrieb wird die Membran auf der Feed-Seite parallel zu ihrer Oberfläche überströmt. Durch diese Überströmung kann die Deckschichtbildung kontrolliert werden, indem Scherkräfte erzeugt und abgelagerte Partikel in die Strömung zurückgeführt werden. Bei getauchten Modulen lässt sich dieser Effekt auch durch einen tangentialen Lufteintrag erzielen. Dies wird als Semi-Cross-Flow bezeichnet. Nachteilig ist beim Cross-Flow-Betrieb der hohe Energiebedarf, der für die Membranüberströmung notwendig ist.



**Bild 2-1: Gegenüberstellung der Betriebsweisen Dead-End und Cross-Flow (MELIN und RAUTENBACH, 2007)**

### Membranmodule

Module fassen Membranen als funktionelle Einheit zusammen. Je nach Aufbau kann zwischen Flachmembranen und Schlauchmembranen unterschieden werden. Zu den Flachmembranen gehören das Plattenmodul, das Kissenmodul und das Wickelmodul. Zu den Schlauchmembranen zählen das Rohrmodul, das Kapillarmodul und das Hohlfasermodule. Bild 2-2



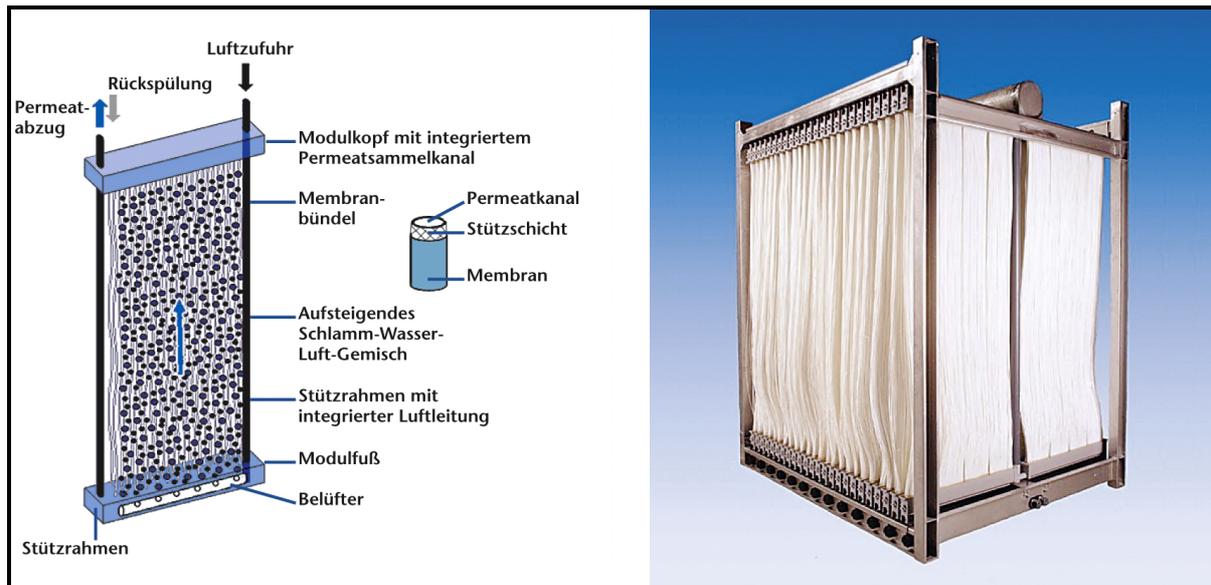
bis zu 20 g/l realisiert werden, die im Vergleich zu konventionellen Kläranlagen um das Vier- bis Fünffache höher liegen und infolge der höheren Dichte an Mikroorganismen kleinere Beckenvolumina ermöglichen.

Gegenüber konventionellen Kläranlagen kann mit Membranbioreaktoren eine höhere Reinigungsleistung erzielt werden. Der nahezu vollständige Rückhalt von Partikeln führt zu einer deutlichen Reduzierung der CSB-Belastung im Kläranlagenablauf und ermöglicht einen Rückhalt von am Schlamm anhaftenden Bakterien. Allerdings besteht bei kritischen Belastungszuständen der biologischen Reinigungsstufe im Vergleich zu konventionellen Anlagen eine erhöhte Gefahr, dass durch die kleineren Reaktorvolumina bei Membranbioreaktoren (infolge höheren TS-Gehalts und Wegfalls der Nachklärbecken) Konzentrationsspitzen gelöster Abwasserinhaltsstoffe im Filtrat auftreten können.

Die Wahl der einzusetzenden Reinigungskemikalien wird durch die Verträglichkeit mit dem Membranmaterial, die Art der Verschmutzungen, die einzuhaltenen Überwachungswerte (z.B. AOX) und den erzielten Reinigungserfolg bestimmt. Die durchzuführenden Reinigungen erfordern neben den Kosten für Chemikalien und Personal auch eine ausreichende Reservekapazität der übrigen Anlage, damit zu jeder Zeit eine ausreichende Abwasserbehandlung gewährleistet ist.

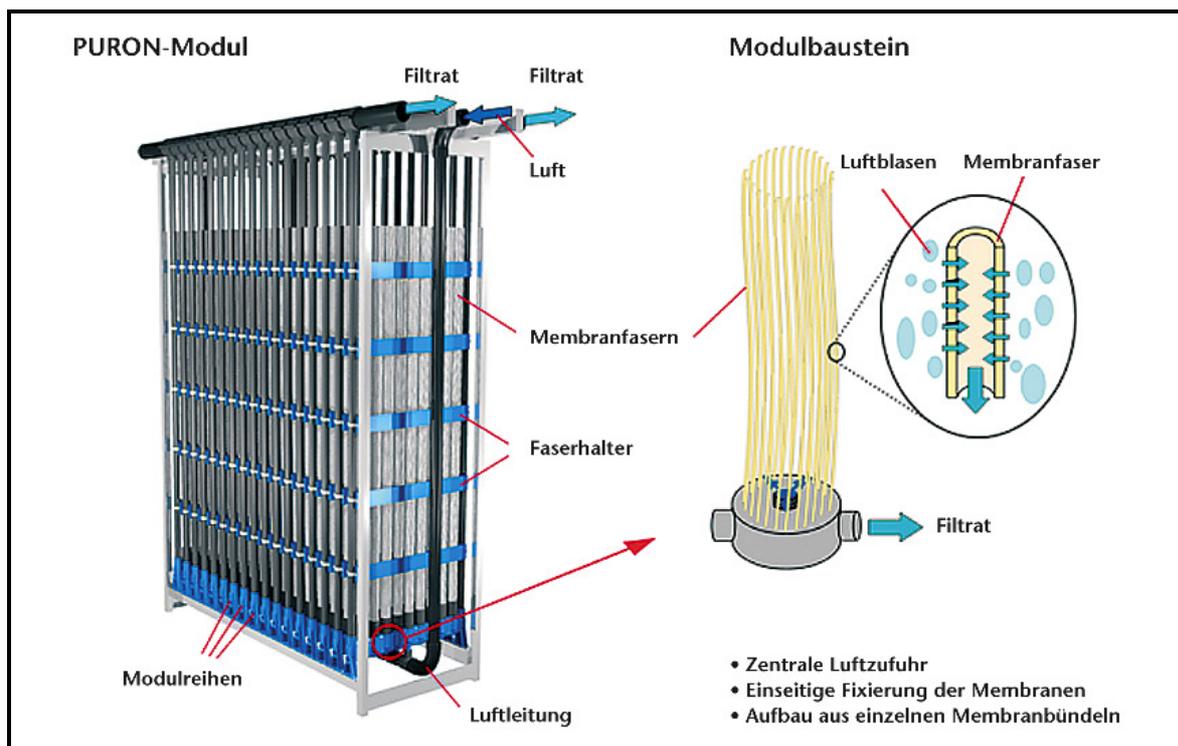
Die meisten derzeit, weltweit großtechnisch eingesetzten Membranmodule zur kommunalen Abwasserreinigung sind Kapillar- und Plattenmodule. Im Folgenden werden die gängigsten Membranmodule und ihre Funktionsweise beschrieben.

Das im Bild 2-4 dargestellte ZeeWeed<sup>TM</sup>-Modul der Firma ZENON besteht aus einer Vielzahl röhrenförmiger Membranen mit einem Durchmesser von 3 mm, die parallel zueinander zwischen Modulkopf und -fuß eingeharzt sind. Zur Minimierung der Deckschichtbildung auf den Membranflächen wird am Fuß des Moduls grob- bis mittelblasige Luft eingepresst. Eine zusätzliche Deckschichtentfernung ist durch eine zyklische filtratseitige Rückspülung möglich. (PINNEKMAP und FRIEDRICH, 2006)



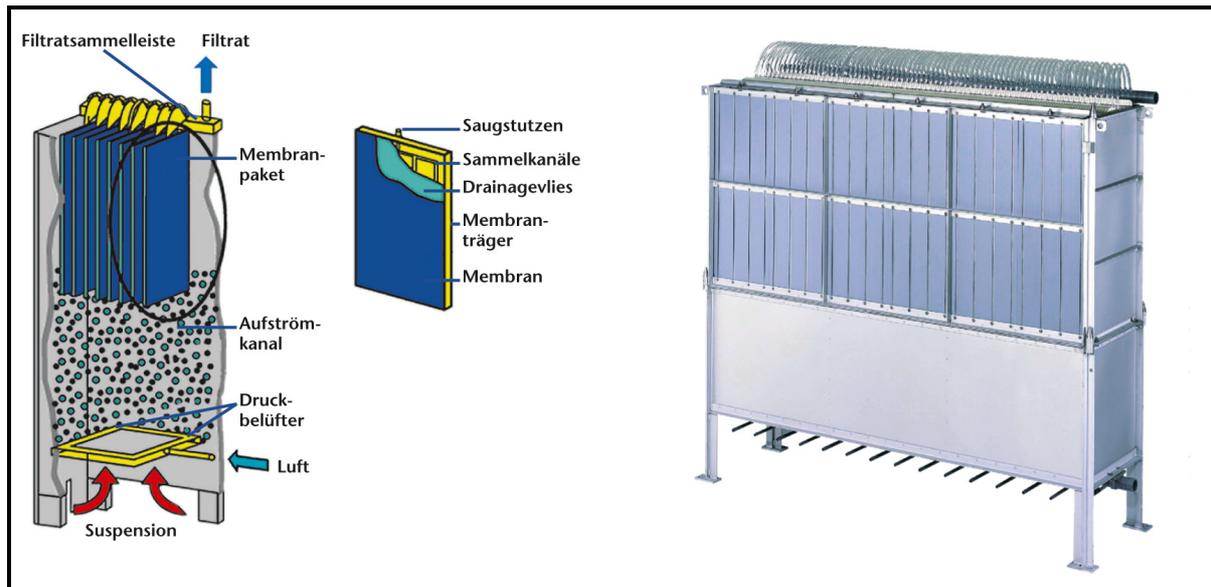
**Bild 2-4: Funktionsprinzip und Modulkassette des ZeeWeed™ der Firma ZENON (links: schematische Darstellung des Funktionsprinzips; rechts: Foto der technischen Ausführung der Modulkassette) (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006)**

Die Grundidee des im Bild 2-5 dargestellten PURON-Moduls der Firma Koch Membrane Systems AG basiert auf Bündeln aus Membranfasern, die nur am unteren Ende des Moduls fixiert sind. Am oberen Ende sind die Membranfasern verschlossen und bewegen sich frei im zu filtrierenden Medium. Über eine Luftdüse, die in der Mitte eines Modulbausteins angeordnet ist, wird gezielt Luft zur Bewegung und Abreinigung der Membranen eingetragen. Dadurch werden Membranbeläge bzw. beginnende Verschlämmungen aus dem Modul ausgetragen. Auch Haare und faserige Bestandteile können nach oben ausgetragen werden, wodurch das Problem einer Verzopfung der Module auch bei relativ grober Vorsiebung vermieden werden soll. (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006)



**Bild 2-5: PURON-Modul und Modulbaustein (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006, 2006)**

Alternativ zu den Kapillar- bzw. Hohlfasermembranen finden auch Plattenmodule in der kommunalen Abwasserreinigung Anwendung. Die Plattenmodule der Firma Kubota (Bild 2-6) bestehen aus einer Trägerplatte, auf die beidseitig die Membranschicht aufgeschweißt ist. Zwischen Platte und Membran befindet sich ein Drainage- und Stützvlies. Die einzelnen Platten werden in einem Abstand von 6 mm parallel zueinander und senkrecht stehend zu einem Plattenpaket zusammengefasst und in einen Stützrahmen eingefasst. Dieser ist seitlich geschlossen und auf einen Aufströmkanal montiert, an dessen Fuß eine Druckluft-Belüftungsanlage angeordnet ist. Die Entfernung der Deckschicht erfolgt nicht durch filtratseitiges Rückspülen, sondern intervallweise Unterbrechungen des Filtrationsbetriebes bei fortlaufender Modulbelüftung. Die Pausenzeit zur Entspannung der Membran variiert je nach Abwasserzusammensetzung. (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006)



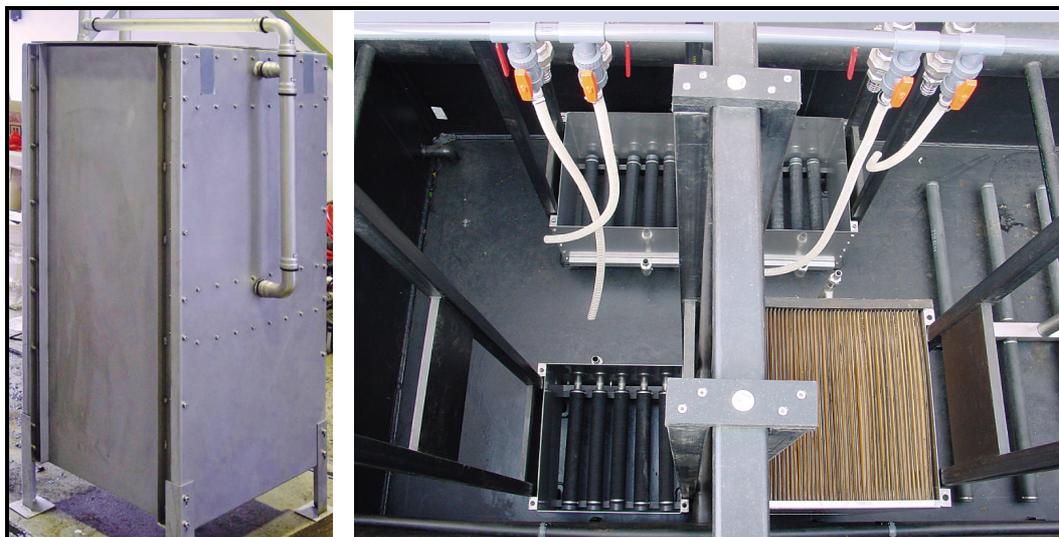
**Bild 2-6: Plattenmodul der Firma Kubota (links: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips; rechts: Foto der Anordnung der Plattenmodule als Plattenpaket) (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006)**

Von der Martin Systems AG wird unter dem Namen siClaro® ein weiteres Plattenmodul vertrieben. Jede Membran ist auf ein Stützgerüst mit offener Gitterstruktur geschweißt. Auf ein Drainagevlies kann verzichtet werden. Die Stützgerüste werden zu Modulblöcken verschweißt. Auf jeden Modulblock werden quer zum Stützgerüst im Kopf- und Fußbereich Filtratsammler montiert. Für den technischen Einsatz werden mehrere Modulblöcke miteinander verbunden. Durch den Einsatz feinblasiger Belüfter unterhalb des Modulpaketes soll ein höherer Sauerstoffeintrag erzielt werden. Bild 2-7 zeigt das Schema eines Modulblocks und ein anschlussfähiges Modulpaket. (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006)



**Bild 2-7: Membranmodul der Martin Systems AG (links: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips; rechts: anschlussfähiges Modulpaket) (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006)**

Ein weiteres Plattenmembransystem wird von der Firma A3 Abfall-Abwasser-Anlagentechnik GmbH/Hese Umwelt GmbH angeboten. Bild 2-8 zeigt die Ansicht des Plattenmembranmoduls. (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006)



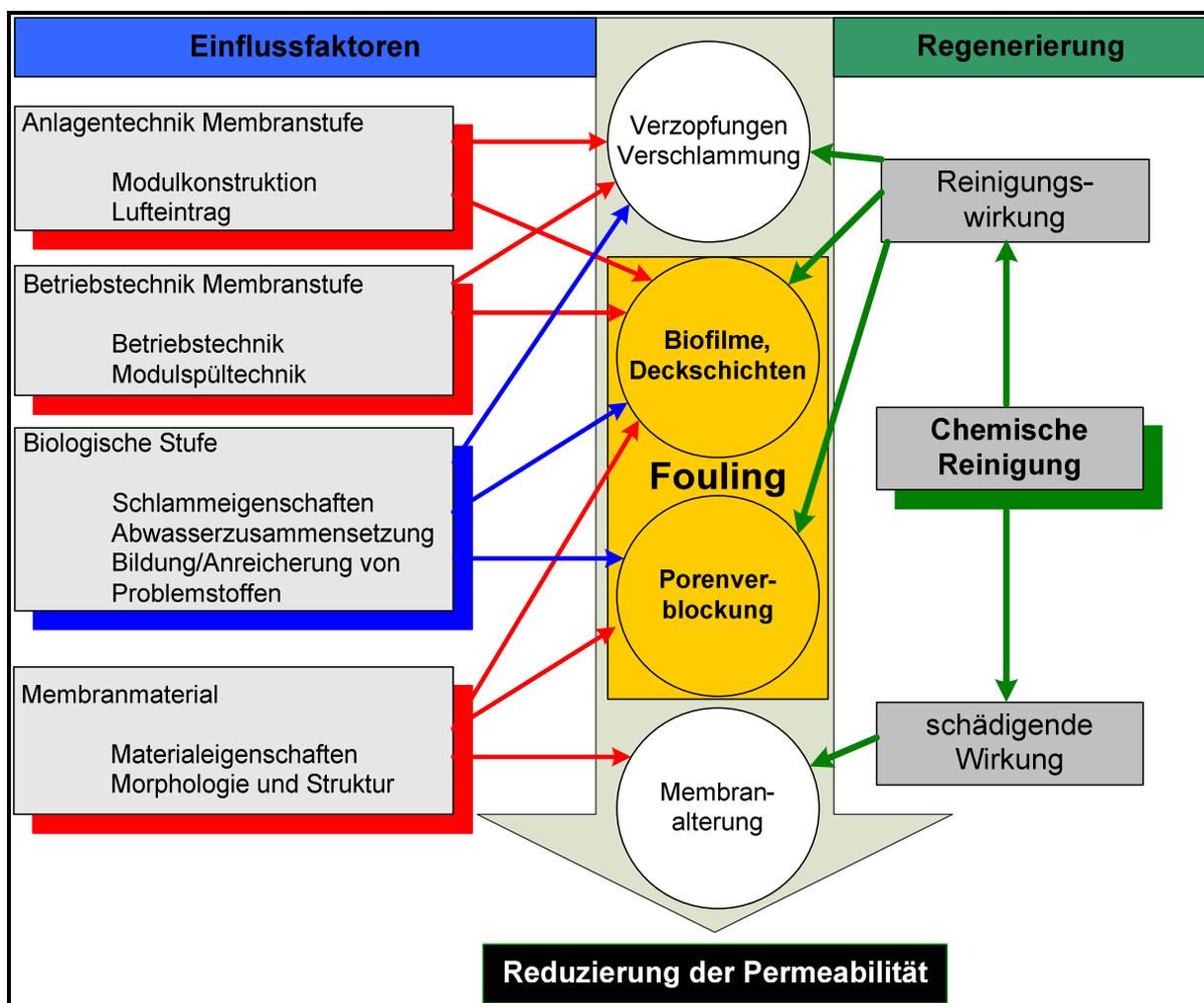
**Bild 2-8: Plattenmodul der Firma A3 GmbH (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006)**

Des weiteren existieren auf dem Markt noch weitere Membranhersteller wie .....

## 2.2 Leistungslimitierende Faktoren beim Membranbelebungsverfahren

In Membranbelebungsanlagen führen unterschiedliche Phänomene zu einer verminderten Leistungsfähigkeit der Membranen. Hierzu zählen mikroskopische Phänomene, die sich

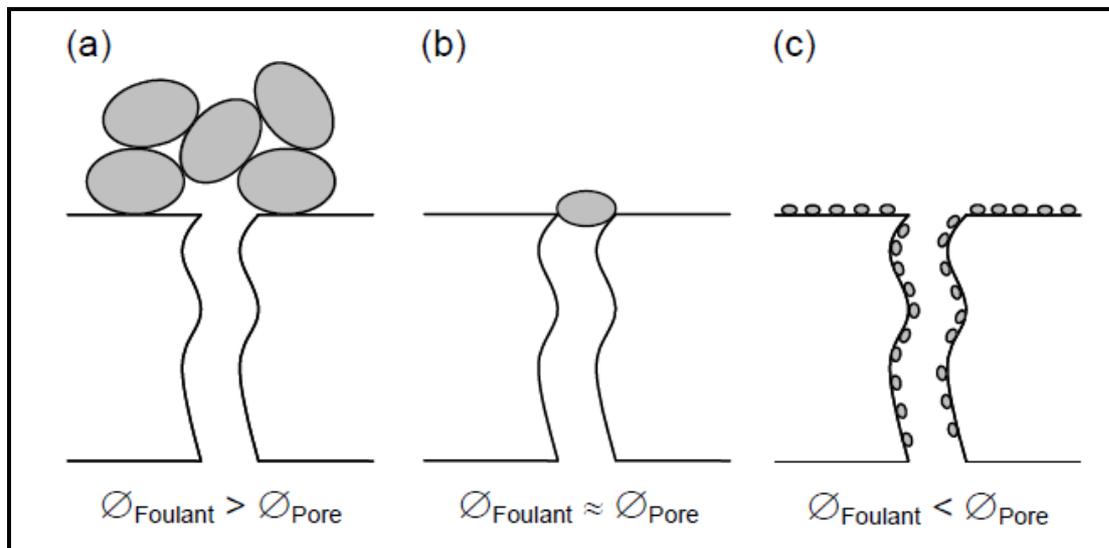
unmittelbar auf oder in der Membran abspielen. Zentrale Bedeutung hat dabei das Membranfouling in Form von Deckschicht- und Biofilmbildung auf der Membran sowie die Porenverblockung innerhalb der Membran. Diese Phänomene werden durch verfahrens- und betriebstechnische Faktoren, wie beispielsweise die transmembrane Druckdifferenz oder die Belüftungsrate, aber insbesondere auch durch materialspezifische Aspekte (Membraneigenschaften) sowie stoffspezifische Aspekte (Problemstoffe im belebten Schlamm) und die Filtrationseigenschaften des belebten Schlammes beeinflusst. Daneben existieren makroskopische Phänomene, wie Verzopfung und Verschlammung der Membranmodule, die zu einer Verringerung der Filtrationsleistung beitragen. Diese werden nicht nur durch Betriebs- und Prozessbedingungen sondern insbesondere auch durch anlagentechnische Gesichtspunkte, wie Modulkonstruktion und Lufteintrag bzw. Luftverteilung beeinflusst. (Bild 2-9)



**Bild 2-9:** Permeabilitätsmindernde Faktoren beim Membranbelebungsverfahren (MUNLV, 2007)

## 2.2.1 Foulingverhalten von Niederdruckmembranen

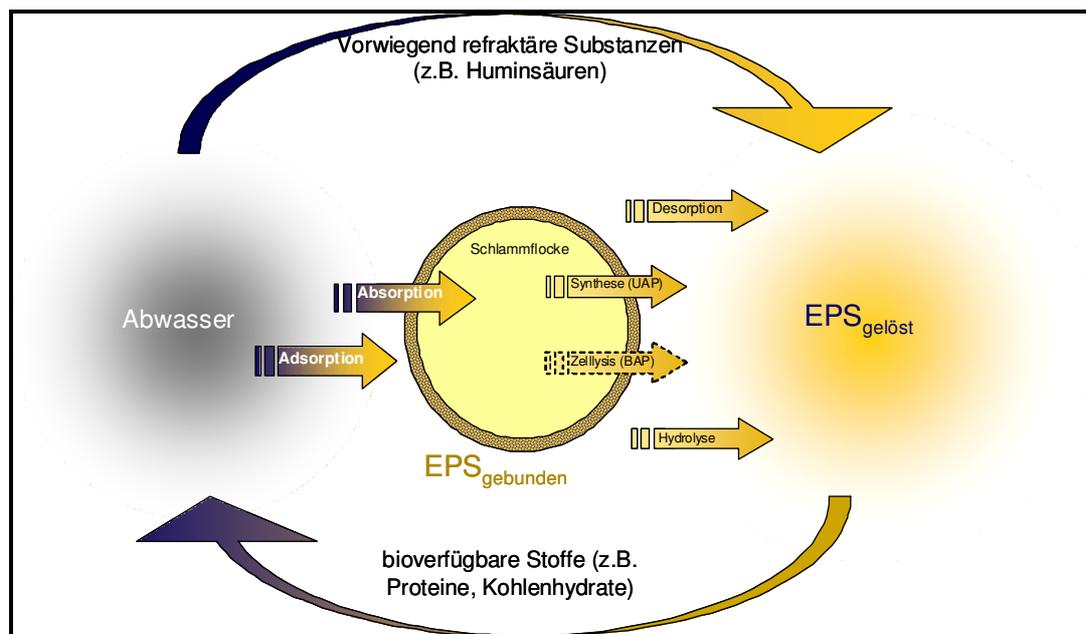
Der Begriff des Membranfouling wird von CRITTENDEN et al. (2005) definiert als „ein Prozess, der durch die Ablagerung suspendierter Feststoffe oder gelöster Substanzen auf der äußeren Oberfläche, an den Porenöffnungen oder innerhalb der Poren einer Membran zum Verlust ihrer Leistungsfähigkeit führt“. Durch diese Prozesse wird die für die Filtration zur Verfügung stehende freie Porenfläche der Membran reduziert, so dass sich der bei der Passage der Membran zu überwindende Filtrationswiderstand erhöht. Dies hat zur Folge, dass bei der Filtration bei konstantem Druck der Permeatfluss sinkt bzw. beim Betrieb mit konstantem Permeatfluss der Transmembrandruck ansteigt. Anhand der Porenpassierbarkeit der Inhaltsstoffe werden drei grundsätzliche Foulingmechanismen unterschieden (Bild 2-10).



**Bild 2-10:** Schematische Darstellung der Foulingmechanismen (a) Filterkuchen- oder Deckschichtbildung, (b) Porenverblockung, (c) Poreneinschnürung (CRITTENDEN et al., 2005)

- Stoffe, deren Durchmesser größer ist als der Porendurchmesser, werden an der Membranoberfläche zurückgehalten und führen durch Ablagerung an der Membranoberfläche zur oberflächlichen Deckschichtbildung.
- Ist der Durchmesser der Membranporen ähnlich groß wie derjenige der Wasserinhaltsstoffe, so können diese durch Ablagerung an den Porenöffnungen den Permeatfluss vollständig unterbinden, d. h. es erfolgt eine Porenverblockung.
- Porengängige Wasserinhaltsstoffe passieren die Membran in der Regel mit dem Permeatfluss, können jedoch auch durch Adsorption an den Porenwänden innerhalb der Membranporen abgelagert werden. Infolge dieser Poreneinschnürung wird der für den Permeatfluss zur Verfügung stehende effektive Porendurchmesser reduziert.

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf das Foulingverhalten von Membranen sind die extrazellulären polymeren Substanzen (EPS). Die EPS werden in eine fest an Bakterien gebundene und eine gelöste Fraktion in wässriger Phase unterteilt. EPS sind ein wesentlicher Bestandteil von Flocken des belebten Schlammes und bestimmen die Struktur und die physikochemischen Eigenschaften der Schlämme. Sie bestehen überwiegend aus Polysacchariden, Proteinen, Kohlenhydraten, Lipiden und Huminstoffen (Bild 2-11). (WETT 2005; BAUMGARTEN, 2007)



**Bild 2-11: Modellschema zur EPS-Bildung (WETT, 2005)**

EPS ist, wie bereits diskutiert, ein wesentlicher Bestandteil von Belebtschlammflocken und besteht aus organischen Makromolekülen, die mikrobiellen Ursprungs sind. Sie liegen als an den Belebtschlamm gebundene EPS und, suspendiert, als gelöste EPS vor. Die genauen Wirkmechanismen zwischen EPS-Konzentration und Foulingpotenzial sind nicht bekannt. Es liegen widersprüchliche Aussagen in der Literatur hinsichtlich der Wirkung von EPS auf das Foulingverhalten von Membranen vor. So haben ROSENBERGER und KRAUME (2002) und BOUHABILA et al. (2001) in ihren Untersuchungen einen leistungsmindernden Einfluss des gelösten EPS auf die Filtrierbarkeit festgestellt. NAGAOKA et al. (1996) beobachteten einen negativen Einfluss des gebundenen EPS auf die Filtrierbarkeit. MIKKELSEN und KEIDING (2002) dagegen schreiben den gebundenen EPS einen positiven Einfluss auf die Filtrierbarkeit zu, da diese eine Ausbildung von größeren Flocken zur Folge hat. Andere Untersuchungen konnten keinen Zusammenhang zwischen den Konzentrationen an gebundenen EPS und der Filtrationsleistung und nur einen schwachen Zusammenhang zwischen den Konzentrationen an gelösten EPS und der Filtrationsleistung beobachten (ROSENBERGER, 2003; WINTGENS, 2005; WETT, 2005).

## 2.2.2 Reversibles und irreversibles Fouling

Beim großtechnischen Einsatz von Membranen wird die Filtrationsphase in regelmäßigen Intervallen für wenige Minuten unterbrochen. Innerhalb dieser Filtrationspausen erfolgt kein Transport an die Membranoberfläche und es kommt aufgrund des fehlenden Transmembrandrucks zur Entspannung des Filterkuchens bzw. der Deckschicht. In dieser Phase können in der Deckschicht angelagerte Partikel von der Membranoberfläche abgetragen werden, wenn weiterhin eine parallele Anströmung der Membran vorliegt bzw. die Cross-Flow-Belüftung weiterhin aktiviert bleibt.

Flach- bzw. Plattenmembranen sind materialbedingt häufig nicht rückspülbar. Bei Kapillar- bzw. Hohlfasermembranen kann zusätzlich zu den Filtrationspausen auch die Fließrichtung der Flüssigkeit umgekehrt werden. Durch diesen Mechanismus (Rückspülung) werden zusätzliche Scherkräfte auf die Deckschicht erzeugt, so dass die Deckschicht effizienter abgetragen werden kann.

Der Anteil des Foulings, der durch Filtrationspausen bzw. Rückspülungen wieder aufgehoben werden kann, wird als hydraulisch reversibles Fouling bezeichnet. Im Gegenzug wird vom hydraulisch irreversiblen Fouling gesprochen, wenn die an der Membranoberfläche oder in den Membranporen adsorbierten Substanzen oder eine an die Membranoberfläche angelagerte Gelschicht meistens nicht durch Filtrationspausen oder Permeatrückspülungen entfernt werden können (CHANG et al., 2002). Die durch Adsorption oder Porenverblockung verlorene Permeabilität der Membranen kann durch eine chemische Reinigung teilweise wiederhergestellt werden (reversibles Fouling). Permeabilitätsverluste, die durch chemische Reinigungen nicht ausgeglichen werden können, werden als irreversibles Fouling bezeichnet.

## 2.3 Simulationsmodelle

Ziel war es ein Simulationsmodell für Membranbioreaktoren zu entwickeln, welches speziell die sehr komplexen Vorgänge bei der Reinigung, Relaxation, Filtration und Belüftung getauchter Membranen darstellt. Des Weiteren soll es praktisch anwendbar und gleichzeitig mit standardisierten Simulationsmodellen, wie dem Active Sludge Model (ASM) (HENZE et al., 2000) der International Water Association (IWA) kompatibel sein. Grundsätzlich beschreiben alle ASM Modellansätze die biologischen Abbauvorgänge in Kläranlagen, wobei der am meisten eingesetzte (UHLENHUT, 2004) und weniger komplexe Modellansatz ASM 1 die CSB-Elimination sowie die Stickstoffelimination (Nitrifikation und Denitrifikation) beschreibt. Grundlagen hierfür bilden die stöchiometrischen und kinetischen Beziehungen für 13 Stoffgruppen und acht biologische Prozesse. Das Modell beruht auf folgenden Vereinfachungen:

- Alle beteiligten Reaktionsgrößen sind gleichmäßig im Reaktionsraum verteilt (vollständig durchmischter Rührkesselreaktor)
- Nährstoffe werden teilweise durch Summenparameter charakterisiert
- Die Mikroorganismen haben kein einzeln identifizierbares Schicksal und die innere Struktur wird als unveränderlich angenommen

Angestrebt wurde eine Modellentwicklung, die es ermöglicht, in Abhängigkeit von Zulaufbedingungen, Vorhersagen darüber zu treffen, wie sich bei gegebener Verfahrensvariante der Zustand des Systems verändert.

In der Membrantechnik werden bislang Simulationsansätze für die Filtration eingesetzt, welche häufig mathematische Modelle mit Eingangsgrößen verwenden, die nicht online-messbar sind oder nur durch kostenintensive Laboranalysen bestimmt werden können, wie beispielsweise extrazelluläre polymere Substanzen (NAGAOAK et al., 2008; WANG et al., 2009). Andere Modelle wiederum bilden den Prozess der Membranfiltration und die hieraus resultierende vollständige Phasenseparation mit dem Modellansatz der idealen Nachklärung ab, wodurch keine Vorhersagen des Filtrationsprozesses möglich sind. (PINNEKAMP et al., 2008)

Zur mathematischen Beschreibung der Foulingmechanismen wurden verschiedene Modelle entwickelt. Beispielsweise beschreibt HERMIA (1982) für die Dead-End-Filtration bei konstantem Transmembrandruck den Zusammenhang zwischen kumulativem Permeatvolumen und Filtrationszeit für Deckschichtbildung, Porenverblockung sowie Poreneinschnürung. Allerdings finden die einzelnen Foulingmechanismen im realen Fall üblicherweise nicht separat statt, sondern verlaufen neben- bzw. nacheinander. Basierend auf dem Modell von Hermia entwickelten HO und ZYDNEY (2000) ein Modell für die Dead-End-Mikrofiltration von Lösungen des Proteins BSA, das den Übergang von der anfänglichen Porenverblockung zur Deckschichtbildung beschreibt. Die Gültigkeit dieses zweistufigen Modells wurde für die Dead-End-Filtration von weiteren Proteinlösungen (PALACIO et al., 2002) sowie Lösungen von Huminsäuren (YUAN et al., 2002), das Polysaccharid Alginat (YE et al., 2005) und aus Oberflächenwasser aufkonzentrierten, natürlichen organischen Substanzen (TANIGUCHI et al., 2003) bestätigt.

Diese und weitere Modelle ermöglichen zwar, das Foulingverhalten von (Rein-)Lösungen unter definierten Filtrationsbedingungen mathematisch zu beschreiben, sie sind jedoch zumeist systemspezifisch und in der Regel nicht anwendbar, sobald vom jeweiligen Filtrationsmodus oder der entsprechenden Versuchsgeometrie abgewichen wird. Ein neuerer Ansatz zur Übertragung der Ergebnisse von Testzellenversuchen auf Anlagen im Pilotmaßstab, basierend auf dem Modell von Hermia, findet sich in HUANG et al. (2008).

Die Permeabilität von Membranbelebungsanlagen wird nicht nur von Einflussgrößen wie etwa Nettoflux, Filtrationszyklus, Membranalter oder Betriebsweise beeinflusst, sondern insbesondere auch von den Eigenschaften des belebten Schlammes. Die Schlammeigenschaften sind von zahlreichen Parametern abhängig. Dazu gehören Größen wie das Schlammalter, die Schlammbelastung, die TS-Konzentration, die chemisch-physikalische Abwasserzusammensetzung sowie die Temperatur. In Abhängigkeit dieser Größen kommt es an der Membranoberfläche zur Bildung von Deckschichten. Untersuchungen von Laubach zeigten, dass bei gleichen Filtrationsbedingungen in Abhängigkeit von den Schlamm-eigenschaften unterschiedliche Permeabilitäten zwischen 8 und 180 l/(m<sup>2</sup>·h·bar) erreicht werden konnten (LAUBACH, 2001).

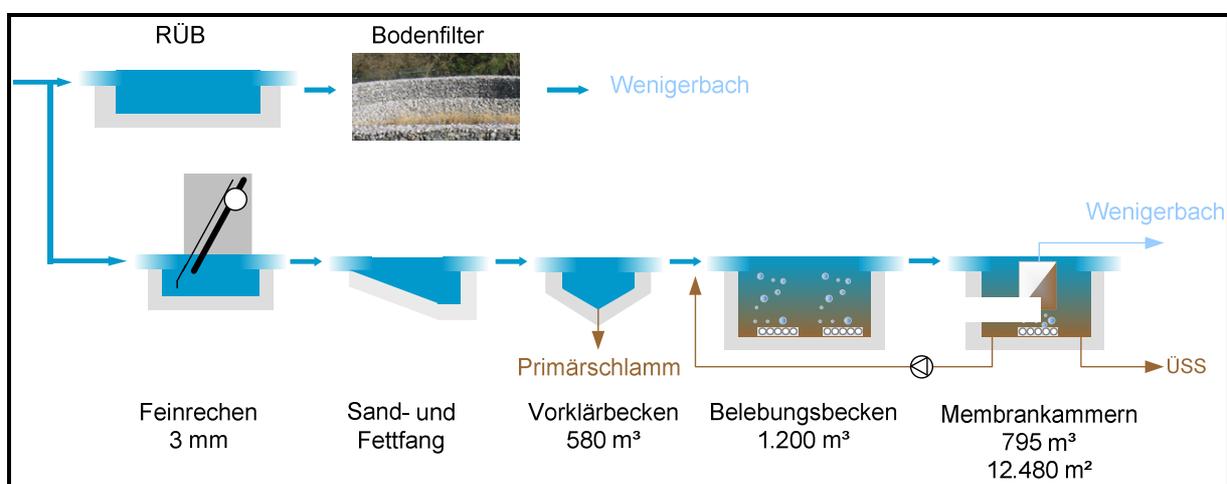
Wesentliche Voraussetzung für die praktische Anwendung von Simulationsmodellen ist die Minimierung aufwendiger und kostenintensiver Messkampagnen. Gerade in Bezug auf die wechselseitigen Beziehungen zwischen der biologischen Reinigung und der Filtration bzw. der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Membran ist es für die Betreiber wünschenswert ein praktisches Modell zu verwenden, welches hauptsächlich nur mit Online-Messwerten arbeitet um somit den Arbeitsaufwand und die Kosten für ein Simulationsmodell zu reduzieren.

### 3 Beschreibungen, Untersuchungen und Ergebnisse der betrachteten Anlagen zur Modellentwicklung

Zu den nachfolgend aufgeführten Anlagen wurden im Rahmen des Vorhabens Betrachtungen in unterschiedlicher Weise und Intensität durchgeführt. Es wurden sowohl bereits vorliegende Ergebnisse genutzt, als auch gezielt projektspezifische Untersuchungen durchgeführt und/oder Modellansätze überprüft.

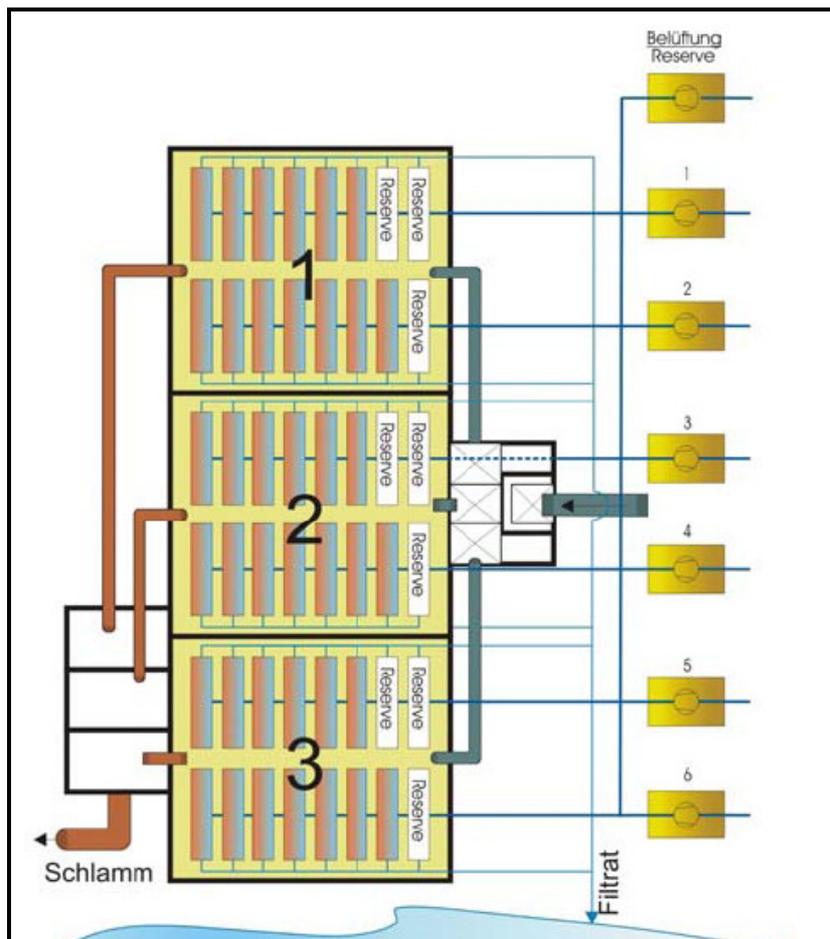
#### 3.1 KA Seelscheid

Die KA Seelscheid wird vom Aggerverband betrieben. Sie hat eine Ausbaugröße von 11.000 Einwohnern. Der Kläranlage vorgeschaltet ist ein RÜB mit nachgeschalteten Retentionsbodenfilter (RBF). Das Fließschema der KA Seelscheid ist in Bild 3-1 dargestellt.



**Bild 3-1: Fließschema der KA Seelscheid**

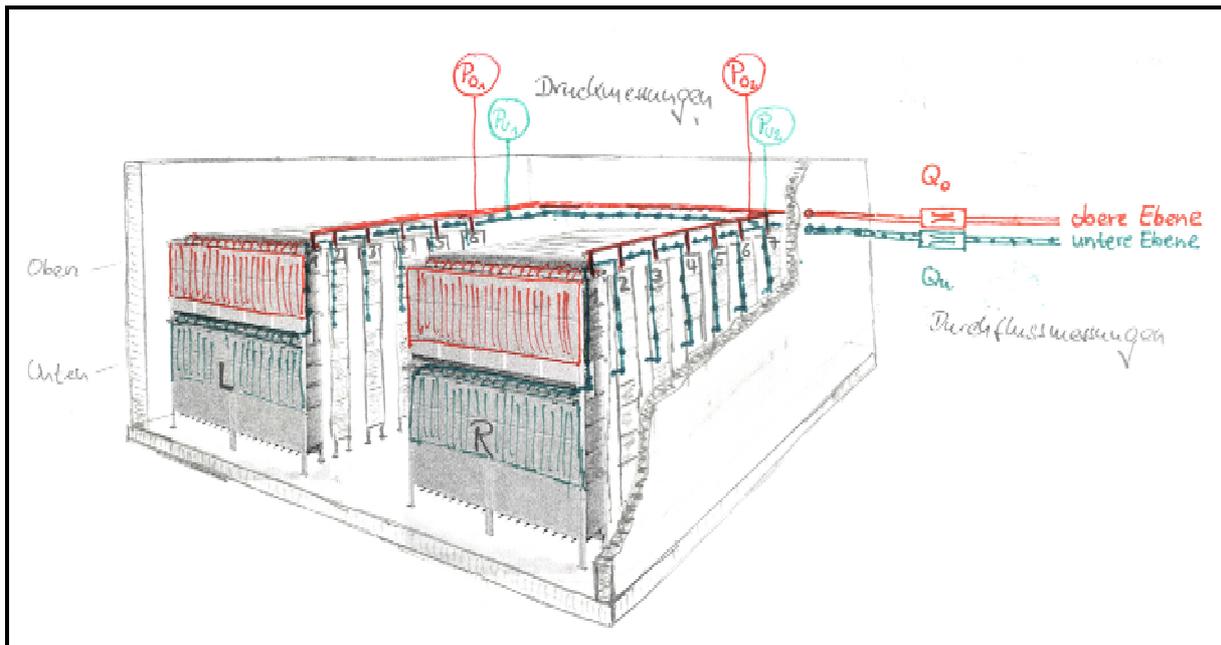
Reinigungsziel der KA Seelscheid ist eine weitgehende Nährstoffelimination sowie eine simultane aerobe Schlammstabilisierung. Der maximale Kläranlagenzufluss beträgt 89 l/s, zuzüglich der internen Wässer in Höhe von 10 l/s ist die Membranfiltration auf einen Gesamtvolumenstrom von 99 l/s ausgelegt. Das Abwasser wird zunächst über zwei parallele Feinrechen mit 3 mm Stababstand geführt. Es schließt sich ein Sand- und Fettfang an. Bevor das Abwasser in die biologische Stufe gelangt, durchfließt es ein Vorklärbecken mit einem Volumen von 580 m³. Die Belebungsstufe von 1.160 m³ wird intermittierend betrieben. Der Sauerstoffeintrag erfolgt über feinblasige Druckbelüftung (1.000 m³<sub>N</sub>/h Luftmenge, 4,50 m Einblastiefe, spez. Ausnutzung 17 gO<sub>2</sub>/(m³<sub>N</sub>·m)). Die Phosphatelimination erfolgt simultan in den Zulaufbereich der Belebungsstufe.



**Bild 3-2: Membranbiologie mit Gebläsezuordnung der KA Seelscheid**

Zur Ermittlung der erforderlichen Membranfläche wurde ein Nettoflux von  $29 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  angesetzt, woraus sich bei maximalem Zufluss eine Fläche von  $12.276 \text{ m}^2$  ergab. Die Anordnung der installierten Membranfläche erfolgte in drei Membranstraßen, die wiederum in zwei Halbstraßen aufgeteilt sind. Die drei Membranstraßen mit einer Größe von je  $265 \text{ m}^3$  (Länge  $7,30 \text{ m}$ , Breite  $8,40 \text{ m}$ , Wassertiefe  $4,50 \text{ m}$ ) werden im freien Gefälle beschickt, die zulaufende Wassermenge wird immer gleichmäßig verteilt.

In jeder Membranstraße befinden sich 13 Doppelstockmodule der Firma Kubota, Typ EK400, die wiederum in zwei Halbstraßen mit sechs bzw. sieben Modulen aufgeteilt sind. Die obere und untere Ebene einer Membranstraße verfügt jeweils über eine separate Mengenmessung. Für jede Ebene beider Halbstraßen ist je eine Druckmessung installiert. (Bild 3-3).



**Bild 3-3: Skizze der Modulanordnung mit Messtechnik einer Membranstraße der KA Seelscheid**

Insgesamt weisen alle Module eine Gesamtoberfläche von 12.480 m<sup>2</sup> auf. Unter Berücksichtigung der Herstellerangabe für den flächenspezifischen Luftbedarf in Höhe von 0,52 m<sup>3</sup><sub>N</sub>/(m<sup>2</sup>·h) ergibt sich eine notwendige Gesamtluftmenge für die grobblasige Cross-Flow-Belüftung von 8.017 m<sup>3</sup><sub>N</sub>/h. Installiert sind sechs Drehkolbengebläse mit je ca. 1.400 m<sup>3</sup><sub>N</sub>/h zuzüglich eines Reserveaggregats. Das Filtrat wird nach dem Heberprinzip (Gravity Flow) abgeführt. Zur Rezirkulation der aufkonzentrierten Biomasse aus den Membranstraßen in die Belebungsstufe stehen drei Pumpen mit einer maximalen Förderleistung von 150 l/s und einer Nennleistung von je 8,2 kW. zur Verfügung.

Die chemische Reinigung der Membranen erfolgt bedarfsweise und Insitu über eine Ansetzstation im Freispiegelgefälle. Die Reinigung erfolgt oxidativ mit Wasserstoffperoxid (1%-ig Lösung, pH-Wert~10,5). Zur Entfernung von anorganischen Substanzen wird Zitronensäure (pH-Wert~2,5) eingesetzt.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Untersuchungen zum permeatseitigen Rohrleitungssystem sowie zur Prozessregelung und -führung beschrieben.

### **3.1.1 Analyse der hydraulischen Bedingungen (permeatseitiges Rohrleitungssystem)**

Bei der Dimensionierung bzw. Modellierung von Membrananlagen spielt die Permeabilität der Membran unter den gegebenen Betriebsbedingungen, d.h. der Permeatfluss bezogen auf die herrschende transmembrane Druckdifferenz, eine entscheidende Rolle. Bei Neuanlagen wird durch die gewählte Permeabilität die erforderliche Membranfläche

bestimmt, und bei realisierten Anlagen dient die ermittelte Betriebspermeabilität zur Steuerung und Regelung der Anlage und als Kriterium zur Einleitung von Reinigungsmaßnahmen. Darüber hinaus wird die Permeabilität als wichtige Basisgröße benutzt, um verschiedene Membran- bzw. Modultypen, Betriebsweisen und Anlagenkonfigurationen zu vergleichen. Aus diesen Gründen ist es unbedingt notwendig, im Sinne einer standardisierten Datenaufnahme, -verarbeitung und -auswertung, insbesondere zur Absicherung und besseren Vergleichbarkeit von Betriebsdaten, die Permeabilität, also das Verhältnis von Permeatfluss und transmembraner Druckdifferenz, richtig zu erfassen.

Im Allgemeinen wird der Permeatvolumenstrom kontinuierlich gemessen und datentechnisch erfasst. Schwieriger gestaltet sich jedoch die Bestimmung der transmembranen Druckdifferenz. Da hier getauchte Membransysteme betrachtet werden, ergibt sich die herrschende Druckdifferenz im Wesentlichen als Differenz des Atmosphärendrucks und eines hydraulischen Überstaus zu einem an der Membran anliegenden Unterdruck. Als Signalgeber für den Unterdruck wird in der Regel ein Messaufnehmer in der Permeatleitung verwendet. Aus dem Überstau und dem Messwert für den Unterdruck wird in der Regel die transmembrane Druckdifferenz ermittelt. Um unterschiedliche Anlagen - aber auch um einzelne Anlagenbereiche - richtig beurteilen zu können, ist jedoch eine detaillierte Analyse der Druckverhältnisse erforderlich, da nicht der Unterdruck an der Messstelle in der Permeatleitung entscheidend ist, sondern der an der Membran anliegende Unterdruck. Dazu muss der gemessene Unterdruck in aller Regel korrigiert werden. Diese Korrektur muss neben der ohnehin erforderlichen Berücksichtigung der Einbausituation, d.h. den hydraulischen Höhen, vor allem die Strömungs-Druckverluste in der Permeatleitung von der Membran bis zur Messstelle sowie den dynamischen Druck an der Messstelle berücksichtigen.

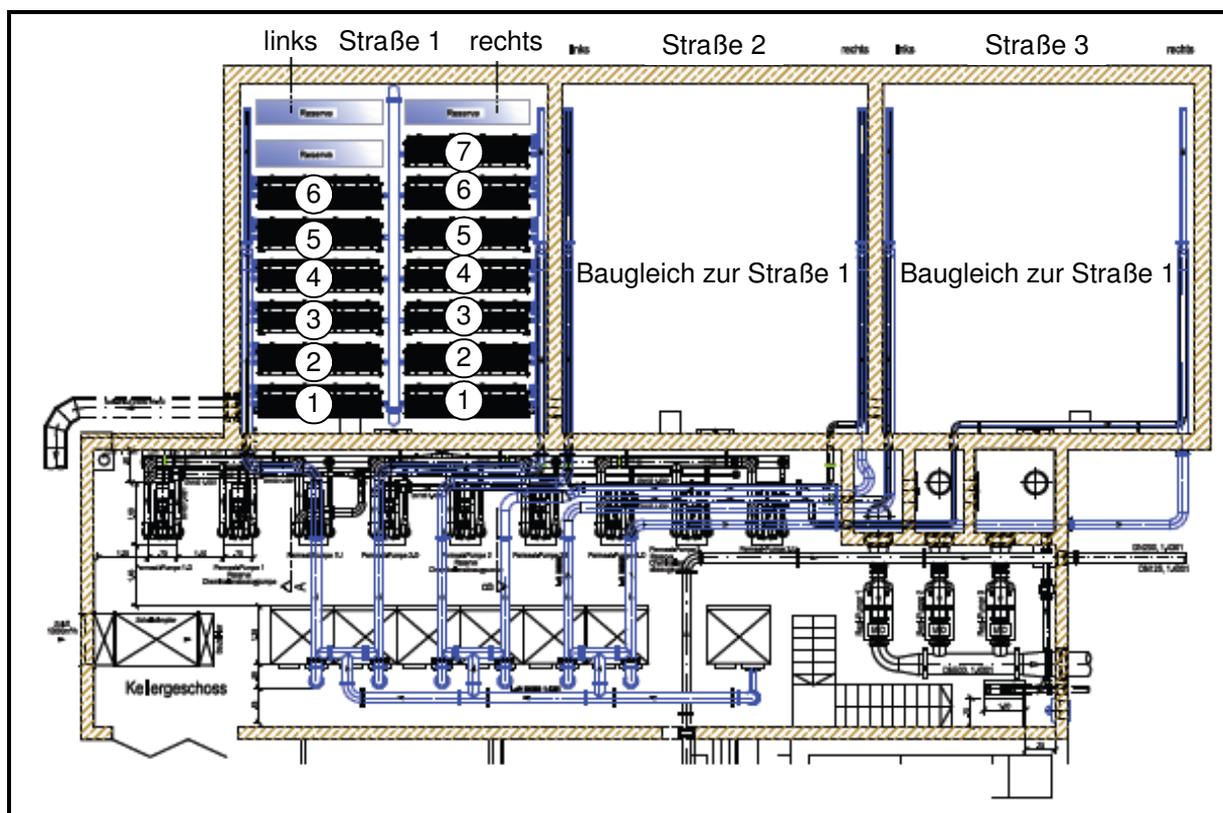
Die transmembrane Druckdifferenz kann bei getauchten Membransystemen durch permeatseitige Pumpen oder auch nur durch die Heberwirkung erfolgen, wenn zwischen dem Permeatauslauf und dem Wasserspiegel im Membranbecken eine ausreichend große Höhendifferenz vorliegt (Gravity-Flow-Betrieb). Im Rahmen der Planung des permeatseitigen Rohrleitungssystems muss für jede Anlage geprüft werden, ob sich in diesem Fall eine gegenseitige Beeinflussung von Teilsträngen ergeben kann, wenn einzelne Membraneinheiten über eine gemeinsame Sammelleitung verbunden sind.

Am Beispiel der Anlage Seelscheid wird im Folgenden die Analyse der hydraulischen Bedingungen im permeatseitigen Rohrleitungssystem erläutert und die Ergebnisse werden beispielhaft dargelegt.

## Korrektur des transmembran Drucks

Zur Bestimmung der treibenden Druckdifferenz wird der Unterdruck im permeatseitigen Rohrsystem für jede Membraneinheit einzeln erfasst. Die jeweiligen Messaufnehmer befinden sich unmittelbar an den Stellen in den Permeatsammlern (Bild 3-3), an denen diese aus den Membranbecken heraustreten. Das bedeutet, dass jede Membranstraße aus vier Membraneinheiten besteht (Bild 3-4):

- Oben links (OL)
- Oben rechts (OR)
- Unten links (UL)
- Unten rechts (UR)



**Bild 3-4: Membrankammern mit permeatseitigem Rohrleitungssystem der KA Scheelscheid**

In erster Näherung entspricht dieser Unterdruck dem transmembranen Druck, da auf der Abwasserseite Atmosphärendruck herrscht. Aufgrund der unterschiedlich langen Rohrleitungen zu den Membraneinheiten ist jedoch auch der Druckverlust in dem permeatseitigen Rohrleitungssystem von den Messaufnehmern bis zu den jeweiligen Membraneinheiten zu berücksichtigen. Darüber hinaus sind Korrekturen bezüglich der hydraulischen Höhen und der dynamischen Drücke erforderlich. Hierzu wurden Druckverlustberechnungen durchgeführt, deren Schlussfolgerungen nachstehend dargestellt werden.

---

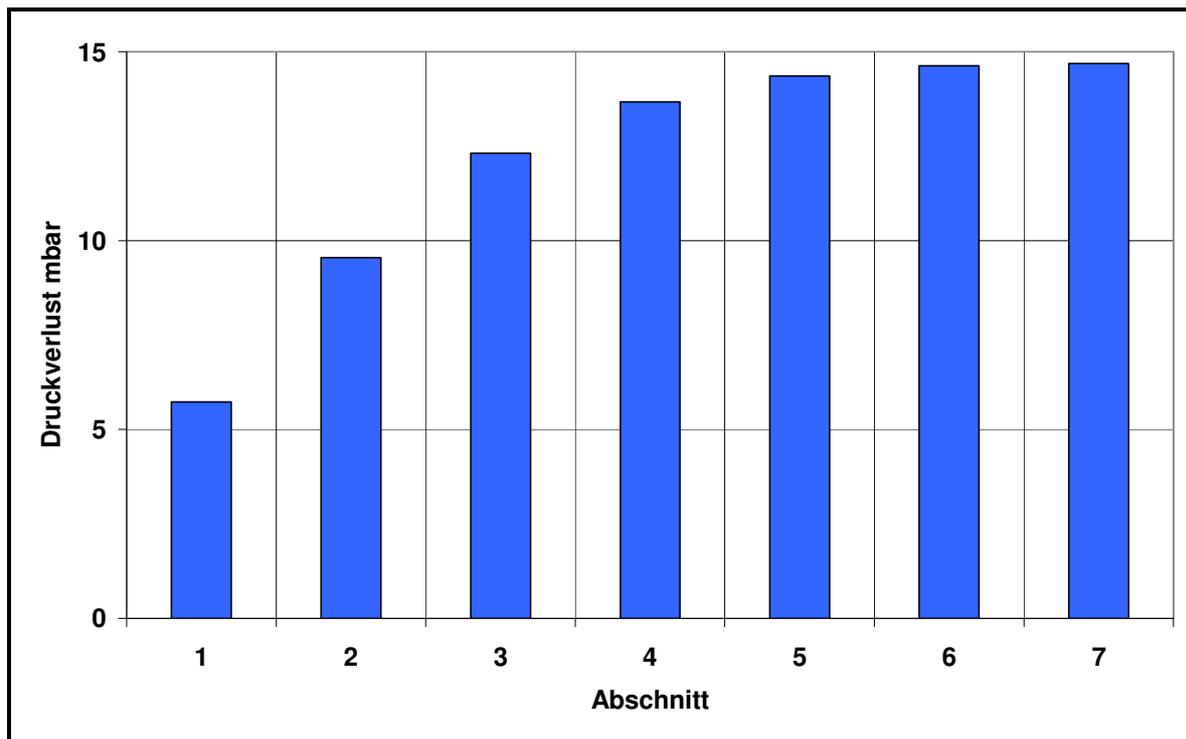
Der Transmembrandruck (TMP) an den einzelnen Membranblöcken ergibt sich aus folgenden (Teil)-Drücken:

1. dem gemessenen Druck an der Messstelle
2. dem dynamischen Druck an der Messstelle
3. dem Druckverlust von der Messstelle bis zu den Membraneinheiten
4. dem Druckverlust des Permeatsammlers innerhalb der Membraneinheiten
5. dem Höhenunterschied zwischen der Messstelle und dem jeweiligen Wasserspiegel

Bei der Berechnung des Druckverlustes von der Messstelle bis zu den Membranblöcken wird wie folgt vorgegangen:

- Berücksichtigt wird zunächst die Rohrleitung von der Messstelle bis zum 1. Membranblock einer Einheit. Danach wurde für jeden Membranblock jeweils 1 T-Stück und 1 m Rohrleitung angesetzt.
- Die Füllhöhe wurde mit ca. 90 % berücksichtigt und die Durchsätze mit ca. 10 l/s. Die genauen Daten für die Berechnung wurden den Messwerten vom 6.12.2008 entnommen. Im Rahmen der Druckverlustberechnung wurden für jede Teilstraße (M1 OR steht für Membranstraße 1 Oben Rechts) Folgendes berechnet:
  - die Massenströme
  - die Strömungsgeschwindigkeiten
  - die vorliegende Reynoldszahl
  - die aus der Reynoldszahl ermittelte Rohrreibungszahl  $\lambda$
  - das Massenstromverhältnis an den T-Stücken
  - die aus dem Massenstromverhältnis abgeleitete Widerstandszahl für die T-Stücke  $\zeta$
  - der für den jeweiligen Abschnitt berechnete Druckverlust  $\Delta p$

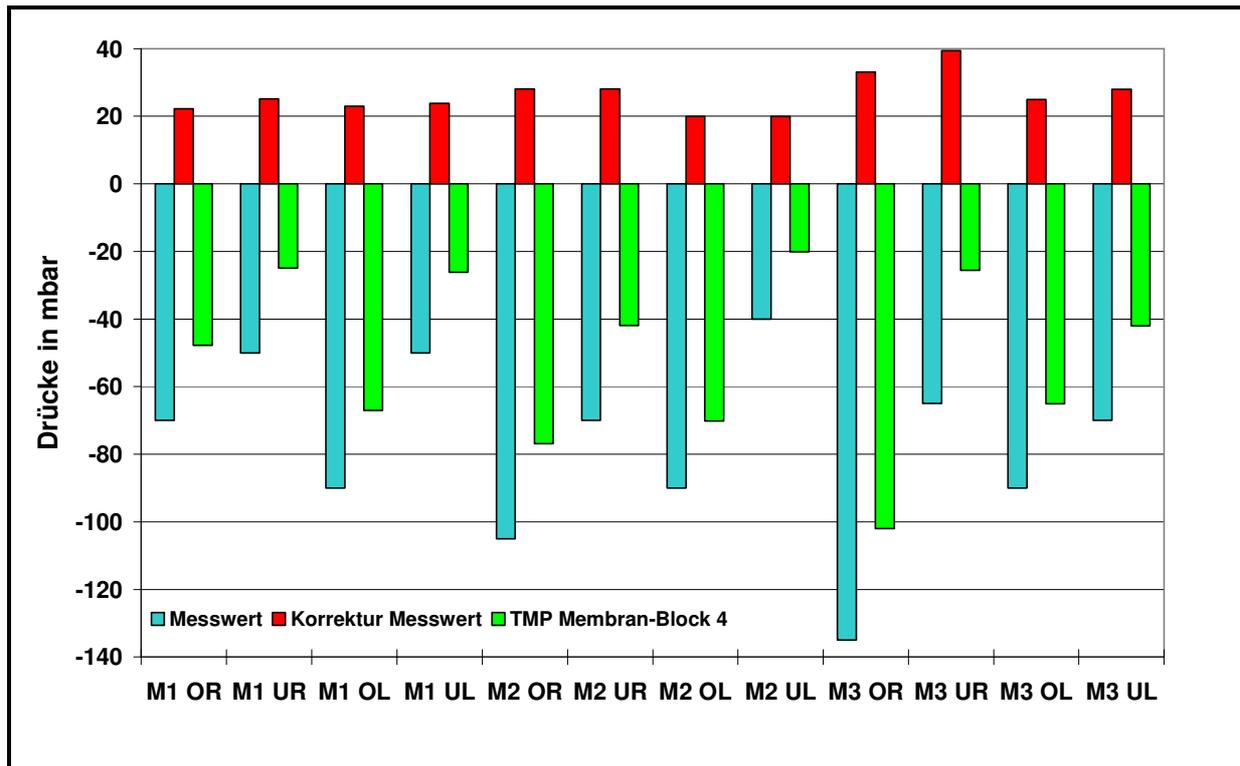
Es wurde experimentell ermittelt, dass der Druckverlust im Permeatsammelrohr einer Membraneinheit vernachlässigbar klein ist, und somit an jedem Membranelement praktisch der gleiche Unterdruck herrscht. Innerhalb der Membraneinheiten einer Straße steigt der Druckverlust von der Anschlussstelle zum Ende hin stetig an (Bild 3-5), wodurch die transmembrane Druckdifferenz abnimmt.



**Bild 3-5: Entwicklung des Druckverlusts über die jeweiligen Membranabschnitte**

Für die Berechnung wurde dabei unterstellt, dass jeder Membranblock den gleichen Permeatvolumenstrom liefert. Wegen der geringer werdenden Strömungsgeschwindigkeit zum Ende des Permeatsammelrohres hin ergeben sich kaum noch Druckänderungen. Für die Korrektur der gemessenen Unterdrücke zur Berechnung der Permeabilitäten wird deshalb vorgeschlagen, den Druckverlust für den mittleren Abschnitt zu verwenden (hier Abschnitt 4).

Mit den berechneten Daten kann nun ein korrigierter Unterdruck ermittelt werden, der bei der Berechnung der Permeabilitäten die Anlagenspezifika weitgehend ausschließt und somit nur den Membranwiderstand berücksichtigt. In Bild 3-6 sind für die einzelnen Membraneinheiten der Original-Messwert für den Unterdruck, die zugehörige Korrektur (Berücksichtigung der statischen und dynamischen Druckverluste) und die reale transmembrane Druckdifferenz dargestellt.

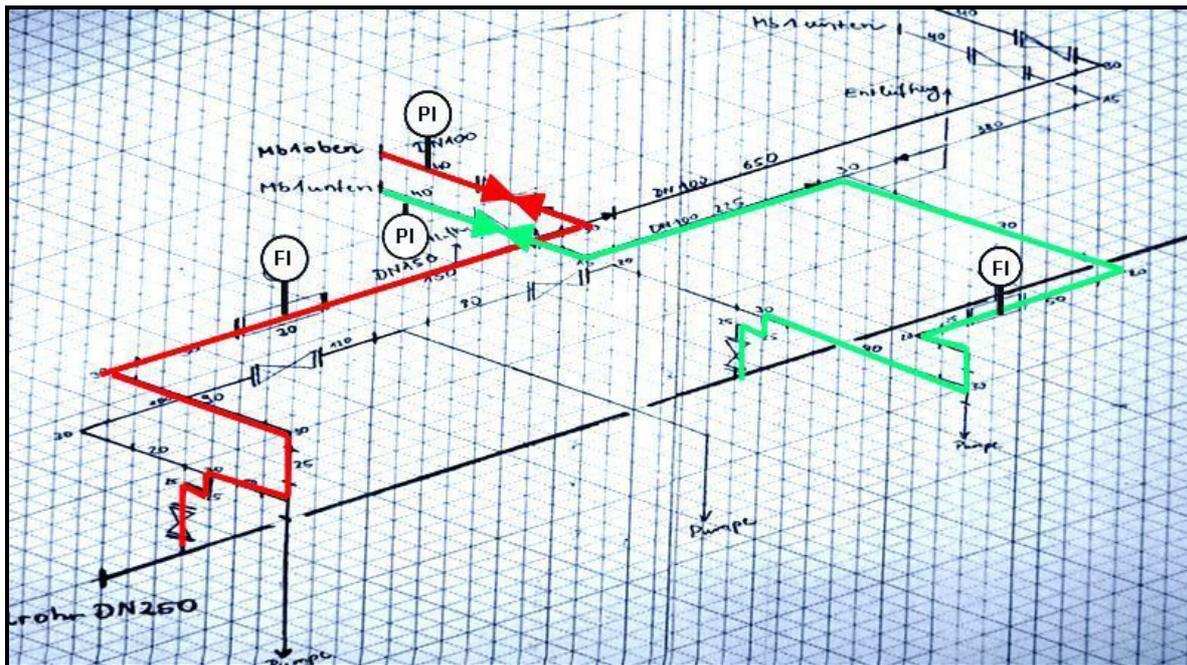


**Bild 3-6: Korrektur des Unterdruckes**

Aufgrund der Tatsache, dass für die zuvor beschriebenen Korrekturen ein hoher Berechnungsaufwand notwendig ist und dieser in der Regel von den Betreiber nicht durchgeführt wird, ist ein direkter Permeabilitätsvergleich zwischen unterschiedlichen Anlagen – hier sogar zwischen den verschiedenen Membraneinheiten – nicht direkt möglich.

### **Gravity-Flow-Betrieb/Pumpenbetrieb bei Teil- und Vollast**

Die KA Seelscheid wird im Gravity-Flow-Betrieb gefahren und alle Membraneinheiten münden in ein gemeinsames Sammelrohr, das in einen Ablaufschacht mit einem definierten Überlauf mündet. Dadurch ergibt sich die maximal zur Verfügung stehende Druckdifferenz für die Überwindung des Membranwiderstands und des permeatseitigen Druckverlustes aus dem Höhenunterschied zwischen dem Wasserspiegel im Membranbecken und dem Auslauf. Für den Gravity-Flow-Betrieb ergibt sich damit ein wesentlicher Unterschied zu einem Betrieb mit permeatseitigen Pumpen. Bild 3-7 zeigt einen Ausschnitt aus der Rohrleitungs-isometrie.



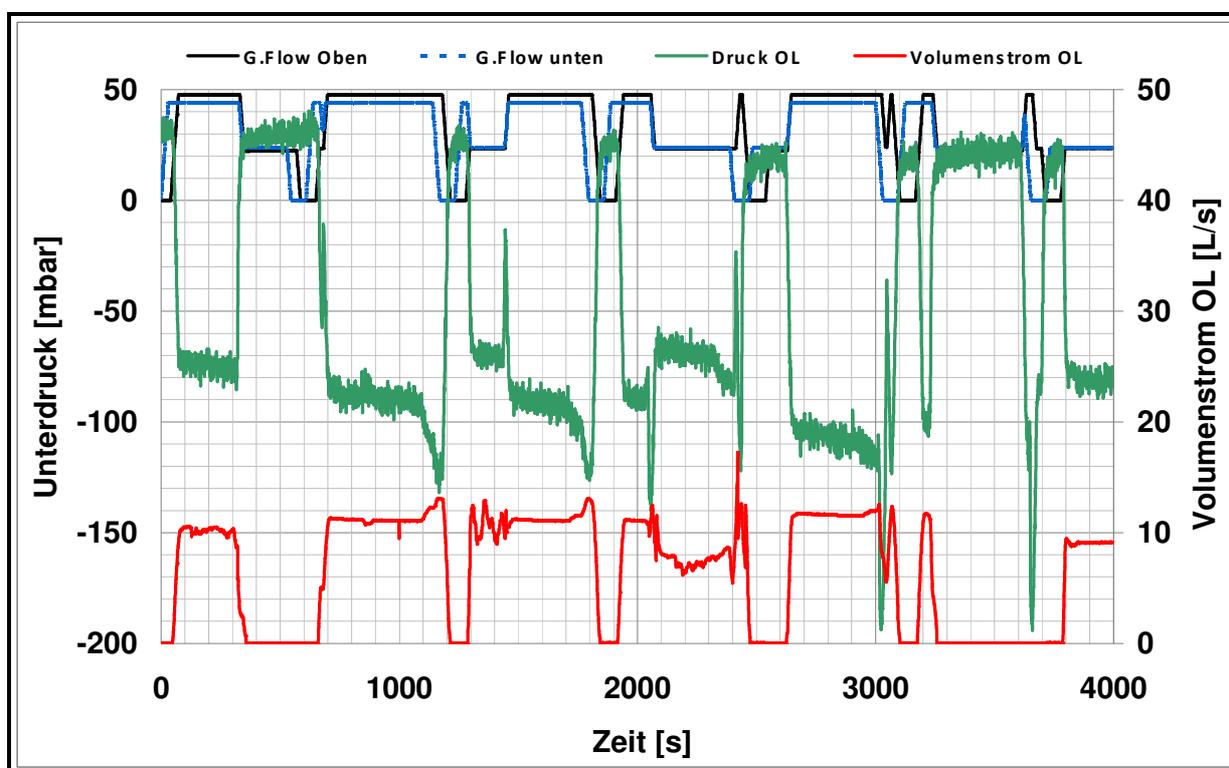
**Bild 3-7: Ausschnitt Rohrleitungsisometrie**

Die maximal zur Verfügung stehende Druckdifferenz für die Überwindung des Membranwiderstands und des permeatseitigen Druckverlustes ergibt sich demnach aus dem Höhenunterschied zwischen dem Wasserspiegel im Membranbecken und dem Auslauf. Für den Gravity-Flow-Betrieb ergibt sich damit ein wesentlicher Unterschied zu einem Betrieb mit permeatseitigen Pumpen, der sich insbesondere im Unterschied zwischen Teillast- und Volllastbetrieb zeigt.

Um die Anlagen an den jeweiligen hydraulischen Durchsatz anpassen zu können, sind die Membrananlagen in der Regel in mehrere Straßen aufgeteilt, wobei meist nicht alle Straßen gleichzeitig in Betrieb sind. Bei geringen hydraulischen Lasten ist aber die Strömungsgeschwindigkeit in den Sammelrohren ebenfalls gering, wodurch auch nur ein geringer Rohrleitungsdruckverlust entsteht. Die anliegende transmembrane Druckdifferenz ist entsprechend hoch. Wird die Anlage dagegen bei Volllast betrieben, steigt der Druckverlust in den Sammelleitungen und die transmembrane Druckdifferenz sinkt. In der Folge sinkt bei gleicher Permeabilität der Membranen der Volumenstrom der Membraneinheiten. Soll dieser jedoch konstant gehalten werden, so ist ein hydraulischer Abgleich durch entsprechende Armaturen in den Permeatleitungen erforderlich.

Permeatseitige Pumpen gleichen den Anstieg der Anlagenkennlinie bei Volllastbetrieb durch einen entsprechenden Anstieg der Förderhöhe aus. Bei der Gravity-Betriebsweise kann durch ein höheres Aufstauen im Membranbecken die transmembrane Druckdifferenz erhöht werden.

Beispielhaft wurden die Messdaten aus der Anlage Seelscheid für den Volllastbetrieb vom 23.02.2010 für die Auswertung verwendet. Bild 3-8 zeigt für die Membranstraße MB 1 OL das Betriebsdiagramm bei Volllastbetrieb. Dargestellt sind der Unterdruck, der Volumenstrom und der Öffnungsgrad der Gravitieschieber oben und unten (Bereich 0 bis 50). Man erkennt deutlich den zeitlichen Versatz des jeweiligen Schließzeitpunkts. Dadurch kommt es zu einer Änderung der Strömungsgeschwindigkeit im Sammelrohr und damit zu einer gegenseitigen Beeinflussung des Unterdrucks, wodurch der Unterdruck am Ende des Zyklus deutlich absinkt und der Volumenstrom der noch im Betrieb befindlichen Einheit ansteigt. Diese gegenseitige Kopplung über die gemeinsame Sammelleitung tritt nicht nur innerhalb einer Membranstraße auf, sondern über alle Membranstraßen, da sie alle in eine Sammelleitung münden. (Bild 3-8)



**Bild 3-8: Betriebsdiagramm für die Membranstraße MB 1 OL bei Volllastbetrieb**

Als Ergebnis ist festzuhalten, dass der Gravity-Flow-Betrieb eine energetisch sehr sinnvolle Variante darstellt, aber eine sorgfältige Planung des permeatseitigen Rohrleitungssystems erfordert. Zur Permeabilitätsbestimmung und auch zur Vergleichbarkeit soll nach Möglichkeit ein asymmetrischer Aufbau der Anlage vermieden werden. Bei der Gravity-Flow-Betriebsweise sollten die Permeatleitungen zur Vermeidung von Beeinflussungen nach Möglichkeit hydraulisch entkoppelt werden.

### 3.1.2 Prozessregelung und -führung

Prinzipbedingt greifen Erläuterungen zum Betrieb der Membranbelebungsanlage, zum Energieverbrauch und zur EMSR-Technik stark ineinander und sind in den Teilbereichen nicht eindeutig abgrenzbar. In Seelscheid sind grundsätzlich hydraulische und schmutzfrachtbezogene Steuerungs- und Regelungskomponenten wirksam.

#### Hydraulische Fuzzy-Regelung

Der Permeatabzug der sechs Halbstraßen kann prinzipiell entweder über Permeatpumpen oder mittels Gravity-Flow erfolgen. Da sich Letzteres als effektiv und membranschonend erwiesen hat, wird das Permeat ausschließlich über den Gravity-Flow abgezogen.

Im Normalbetrieb wird das Permeat über Zyklen getaktet abgezogen. Ein Zyklus beträgt insgesamt 10 Minuten, der sich aus der Zeit für das Öffnen und das Schließen des Schiebers (0,5 Minuten), der Pausenzeit (1 Minute) und der verbleibenden effektiven Filtrationszeit (8,5 Minuten) zusammensetzt. Während des gesamten Zyklus werden die Module belüftet.

Jede Halbstraße kann separat angesteuert werden, wobei jeder Halbstraße zwei Klappen für die beiden Ebenen (Membranmodule oben und unten) zugeordnet sind. Die ursprüngliche Regelstrategie sah den Abzug in neun Stufen vor. Die Anforderung aktiven Membranfläche ergibt sich dabei aus dem Füllstand und der Zulaufmenge, wobei der Füllstand (als Mittelwert aller sechs Füllstandsmessungen) zu 80 % und die Zulaufmenge zu 20 % in die Berechnung eingehen. Um eine gleichmäßige Belastung der Membranen und der zugehörigen Gebläse zu erreichen, wird die aktive Membraneinheit (Membraneinheiten) nach jedem Filtrationszyklus systematisch getauscht.

Um ein Verschlammen der Membranen zu vermeiden, muss während des Permeatabzugs das Cross-Flow-Gebläse (CF-Gebläse) permanent in Betrieb sein. Die Steuerung sieht vor, dass der Filtrationszyklus mit der Relaxationsphase gestartet wird. Die eigentliche Abzugsphase dauerte nominell neun Minuten, die Gebläse der CF-Belüftung werden mit der voreingestellten Drehzahl betrieben.

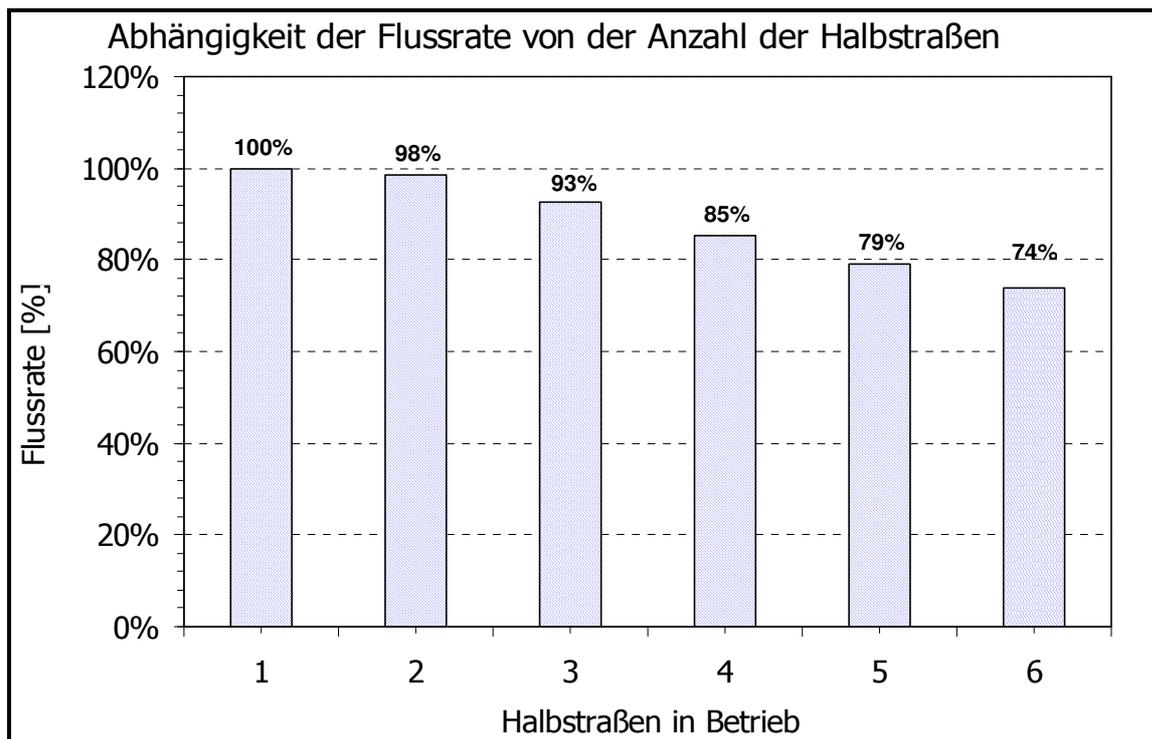
Für jede Membranstraße und jede Ebene existiert ein Durchflussmessgerät. Da der Permeatabzug ausschließlich mittels Gravity-Flow erfolgt und es dafür eine hydraulisch gekoppelte, gemeinsame Ablaufleitung gibt, ist die Flussleistung auch von der Wasserpiegellage in den Membranbecken, dem Öffnungsgrad und von der Anzahl der geöffneten Klappen abhängig.

In Bild 3-9 ist dargestellt, wie sich die Flussleistung bei konstantem Wasserstand verändert, wenn eine Halbstraße in oder außer Betrieb genommen wird. Die Darstellung zeigt, dass sich die Flussleistung pro Halbstraße um 2 % verringert, wenn zu einer Halbstraße eine zweite Halbstraße eines anderen Membranbeckens zugeschaltet wird. Bei sechs be-

triebenen Halbstraßen beträgt die Flussleistung lediglich 74 % der Flussleistung bei nur einer betriebenen Halbstraße.

In der Praxis wird dieser Effekt jedoch gedämpft, weil die Anforderung nach mehreren Halbstraßen und die damit verbundene geringere Flussleistung immer nur bei einem hohen Wasserstand erfolgt, der seinerseits wiederum zu einer höheren Flussleistung führt.

Grundsätzlich ist aufgrund der gegebenen hydraulischen Kopplung der Straßen eine Regelung der Permeatabzugsmenge im Gravity-Flow-Betrieb nicht sinnvoll, da die zu Regelungsinstabilitäten führt.



**Bild 3-9: Abhängigkeit der Flussrate von der Anzahl der Halbstraßen**

### Biologischer Fuzzy-Regler

Bedingt durch die Cross-Flow-Belüftung kommt es in den Membranbecken zu einem zusätzlichen Sauerstoffeintrag. Reicht der Sauerstoffeintrag der CF-Belüftung nicht aus, werden mit dem „Biologischen Fuzzy-Regler“ je Straße zusätzliche Gebläseleistungen angefordert.

Gemäß dem ursprünglichen Konzept sollten hierfür drei Parameter berücksichtigt werden:

- $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt im Ablauf Belebung
- $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalt im Ablauf Belebung
- $\text{O}_2$ -Gehalt in den Membranbecken (je eine Messung pro Straße)

Ein hoher  $\text{NH}_4\text{-N}$ - sowie ein geringer  $\text{O}_2\text{-}$  und  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalt bewirkten hierbei eine hohe Gebläse-Anforderung. Für jede Membranstraße wurde ein eigener Wert als Fuzzy-Gesamtwert berechnet, wobei die  $\text{NH}_4\text{-N}$ -, die  $\text{NO}_3\text{-N}$ - und die  $\text{O}_2$ -Konzentrationen unterschiedlich gewichtet wurden. Sowohl die Gewichtung der drei Parameter als auch die jeweiligen Grenzwerte können angepasst werden.

Durch die verschiedenen Optimierungsmaßnahmen wurde der Einfluss des ursprünglich erstellten biologischen Fuzzy-Reglers weitgehend eingegrenzt und durch die nachfolgend beschriebenen alternativen Strategien ersetzt. Der vorhandene biologische Fuzzy-Regler wird derzeit nur noch bei der Überschreitung einer  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Grenzkonzentration im Ablauf der Belebungsstufe aktiviert.

### **Bauliche und betriebliche Änderungen nach Inbetriebnahme**

Bis zum Oktober 2006 wurde die Anlage gemäß Planung und Vorgaben des Ausrüsters betrieben. Insgesamt lassen sich diese zusammenfassend in folgende sieben Betriebsphasen unterteilen:

- Phase 1: Nov 2005 – Okt 2006 als ursprüngliche Betriebsphase: Die Filtration erfolgt überwiegend mit dem Bemessungsflux geregelt durch den hydraulischen Fuzzy-Regler. Somit wird vermieden, dass die energieintensive Membranbelüftung für geringe Permeatmengen eingesetzt wird. Es erfolgte ein sog. 9/1-Zyklus mit 9 Minuten Filtration und 1 Minute Pause sowie den beschriebenen Tauschintervallen.
- Phase 2: Nov 2006 – Mitte Feb 2008: Umbau des Anaerobbeckens zur Vorklärung sowie Umstellung des Fällmittels von einem Natriumaluminat auf ein Polyaluminiumchlorid um eine Verbesserung der Schlammeigenschaften zu erzielen. Beginn der manuell gesteuerten Belüftung im Belebungsbecken, die bis dahin faktisch nicht genutzt wurde.
- Phase 3: Mitte Feb 2008 – Feb 2009: Erneuerung der feinblasigen Belüftungselemente in der konventionellen Biologie und Änderung der Fuzzy-Regelung für die Membranbelüftung. Der  $\text{NH}_4\text{-N}$  Gehalt im Ablauf der Biologie wird nicht mehr zur Anforderung der Membrangebläse herangezogen.
- Phase 4: März 2009 – Mitte April 2010: Implementierung einer optimalen Aufteilung der insgesamt notwendigen Luftmenge mit dem Ziel den Anteil der grobblasigen CF-Luftmenge zu minimieren. Diese ergibt sich aus dem hydraulischen Durchsatz. Die Differenzluftmenge wird durch feinblasige Belüftung der Biologie gedeckt. Die Zu- und Abschaltung der aktiven Membranfläche und die Verteilung der Luftmenge erfolgt über den vorhandenen und oben beschriebenen hydraulischen Fuzzybaustein.

Seit Februar 2009 werden die drei Rezirkulationspumpen nicht mehr im Dauerbetrieb bei Teillast betrieben. Wenn die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Ablaufkonzentration der Biologie den Sollwerten entsprechen, wird nur noch eine der drei Rezirkulationspumpen alternierend betrieben.

Weiterhin wurde im Februar 2009 der Lufteintrag über die Membrangebläse zur Durchmischung der Membrankammern als sog. Zwangsbelüftung reduziert. Lange Stillstandszeiten einer Kammer werden nun vermieden, indem der Rotationstakt zwischen den einzelnen Halbstraßen von drei auf nur noch einen Zyklus mit 10 min gekürzt wurde und die maximale Stillstandszeit von 30 min auf 120 min erhöht wurde.

- Phase 5: Mitte April 2010 – Anfang Okt 2010: Im Frühjahr 2010 wurde der Luftvolumenstrom der Membrangebläse durch Drehzahlanpassung über die Frequenzumformer in der ersten Halbstraße der Straße 2 (6 Module) von 55 auf 45 Hz bzw. von 60 auf 50 Hz in der zweiten Halbstraße (7 Module) reduziert. Der Einfluss dieser Änderung auf den Betrieb wurde zunächst beobachtet. Nach erfolgreicher Testphase wurden ab Mitte April 2010 die Frequenzen der restlichen Gebläse in den anderen Straßen in gleicher Weise angepasst.
- Phase 6: Basierend auf den Erkenntnissen der simas-Anlage und als Ergebnis der Simulation erfolgt im Oktober 2010, im Februar 2011 und im Mai 2011 eine weitere Absenkung der Frequenz der Membrangebläse um jeweils 5 Hz. Die letzte aktuelle Einstellung in den Halbstraßen mit 6 Modulen beträgt 30 Hz und in den Halbstraßen mit 7 Modulen 35 Hz. Dies entspricht einem aktuellen Luftvolumenstrom von ca.  $0,34 \text{ m}^3_{\text{N}}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , die Daten sind der nachfolgenden Tabelle 3-1 zu entnehmen.

**Tabelle 3-1: Spezifische Luftmengen CF-Gebläse KA Seelscheid [ $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ]**

FU Motor [Hz]	6 Module = 1920m <sup>2</sup>	7 Module = 2240m <sup>2</sup>
60	0,74	0,69
55	0,68	0,58
50	0,61	0,52
45	0,54	0,47
40	0,48	0,41
35	0,41	0,35
30	0,34	0,29
25	0,27	0,23
20	0,21	0,18

## Optimierung der Membranbelüftung

Der größte Energiekonsument in Seelscheid ist die grobblasige Cross-Flow-Belüftung. Diese Art der Belüftung ist hinsichtlich des Sauerstoffeintrags, gemessen wurde ein Sauerstoffeintrag  $\alpha$ SOTR von ca. 25 kg O<sub>2</sub>/h, im Vergleich zu einer feinblasigen Druckbelüftung unwirtschaftlich. Es wurde ein spezifischer Sauerstoffeintrag  $\alpha$ SSOTR von 2,6 g O<sub>2</sub>/(m<sup>3</sup><sub>N</sub>·m) und ein Sauerstoffertrag  $\alpha$ SAE von 0,52 kg O<sub>2</sub>/kWh berechnet. Diese liegen um ca. 40 bis 60 % unter den Werten einer feinblasigen Druckbelüftung auch in einer Membranbelebungsanlage mit erhöhten Feststoffgehalten.

Bis Ende Februar 2009 wurden die Membrangebläse auch zum Sauerstoffeintrag für die biologische Abwasserreinigung eingesetzt. Weiterhin wurde der gesamte Betrieb der Membrananlage nicht direkt an die Zulaufmenge gekoppelt. In der Folge der ersten Optimierungen sank die Summe der täglichen Betriebsstunden der Membrangebläse deutlich. Allerdings schwankten die Gebläselaufzeiten zunächst bei niedrigen Abwassermengen. Ab März 2009 sind diese Schwankungen weitgehend eliminiert: die Anzahl der Membrangebläsestunden korreliert sehr gut mit der behandelten Abwassermenge.

### **Optimierung der Zwangsbelüftung**

Unter Zwangsbelüftung wird hier die Durchmischung des Membranbeckens mit der Cross-Flow-Belüftung bei geringer hydraulischer Auslastung der Anlage definiert. Dadurch sollen nachhaltige Sedimentation des belebten Schlammes sowie anaerobe Zustände vermieden werden.

Im Februar 2009 wurde in Seelscheid der entsprechende Rotationstakt der aktiven Membranhalbstraßen geändert. In Folge dieser Umstellung wird seitdem nach jedem Filtrationszyklus (d.h. nach 9 min + 1 min) die aktive Membranhalbstraße gewechselt. Vorher betrug die Mindestdauer 30 min. Vor Februar 2009 erfolgte eine Zwangsbelüftung in einer Halbstraße, wenn diese 30 min lang nicht belüftet wurde. Nach der Umstellung wird erst nach 120 min Ruhezustand zwangsbelüftet. Nur bei geringen Zuflüssen wird das Intervall zwischen zwei Filtrationszyklen einer Halbstraße 120 min überschreiten, so dass eine Zwangsbelüftung nur noch in seltenen Fällen notwendig ist. Die Dauer der Zwangsbelüftung beträgt nach wie vor 3 min.

Die über lange Zeiträume gemittelten Tageswerte zeigen eine Verringerung der Laufzeiten von 5,5 auf 4,5 Stunden pro Tag und Membrangebläse infolge dieser Maßnahme. In der 4. Phase wurde durch die Änderung des Rotationstaktes und der Laufzeiten eine Einsparung von 143 kWh/d bzw. von durchschnittlich 0,085 kWh/m<sup>3</sup> erreicht.

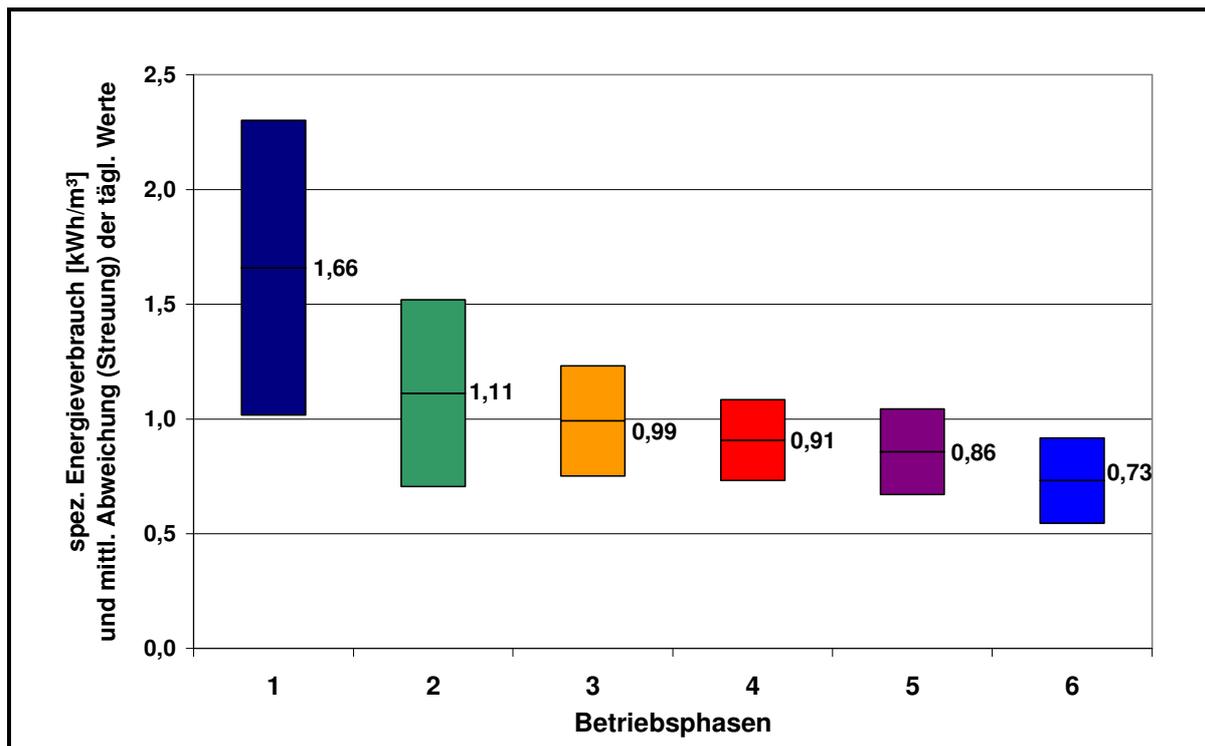
### **Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs**

Insgesamt werden auf der Membranbelebungsanlage Seelscheid 64 verschiedene Energieverbraucher detailliert erfasst und vergleichend bewertet. Tabelle 3-2 gibt einen Auszug der wesentlichsten Energieverbraucher. Die erfassten Aggregate tragen zum Energieverbrauch der Gesamtanlage jedoch nur zu ca. 10 % bei.

**Tabelle 3-2: Laufzeiten der intensiven Energieverbraucher (Auszug)**

	2005/2006	2007	2010	2005/2006	2007	2010
	h	h	h	h/d	h/d	h/d
Biologie Anaerobbecken Rezirkulation Pumpe	12528,58	0,3	0,8	17,16	0,00	0,00
Biologie Anaerobbecken Rührwerk	12672,49	38,6	2231,8	17,36	0,11	6,20
Biologie Denitrifikation Rührwerk 1	12116,21	6565	8900,0	16,60	17,99	23,72
ÜSS Pumpe	482,04	115,6	139,1	0,66	0,32	0,39
Membranbiologie Straße 1 Gebläse 1	11945,62	4261	1664,1	16,36	11,67	4,62
Membranbiologie Straße 1 Gebläse 2	9565,99	2766	1654,0	13,10	7,58	4,59
Membranbiologie Straße 1 Rezirkulation Pumpe	16987,03	8566	3653,5	23,27	23,47	10,15
Membranbiologie Straße 2 Gebläse 1	8006,87	2794	1702,0	10,97	7,65	4,73
Membranbiologie Straße 2 Gebläse 2	10242,38	4399	1680,2	14,03	12,05	4,67
Membranbiologie Straße 2 Rezirkulation Pumpe	17158,94	8719	3670,1	23,51	23,89	10,19
Membranbiologie Straße 3 Gebläse 1	8706,45	2790	1663,0	11,93	7,64	4,62
Membranbiologie Straße 3 Gebläse 2	10987,37	4224	1656,5	15,05	11,57	4,60
Membranbiologie Straße 3 Rezirkulation Pumpe	568,21	8725	3642,7	0,78	23,90	10,12
Notfall Zusatzgebläse	250,56	175,6	15,9	0,34	0,48	0,04

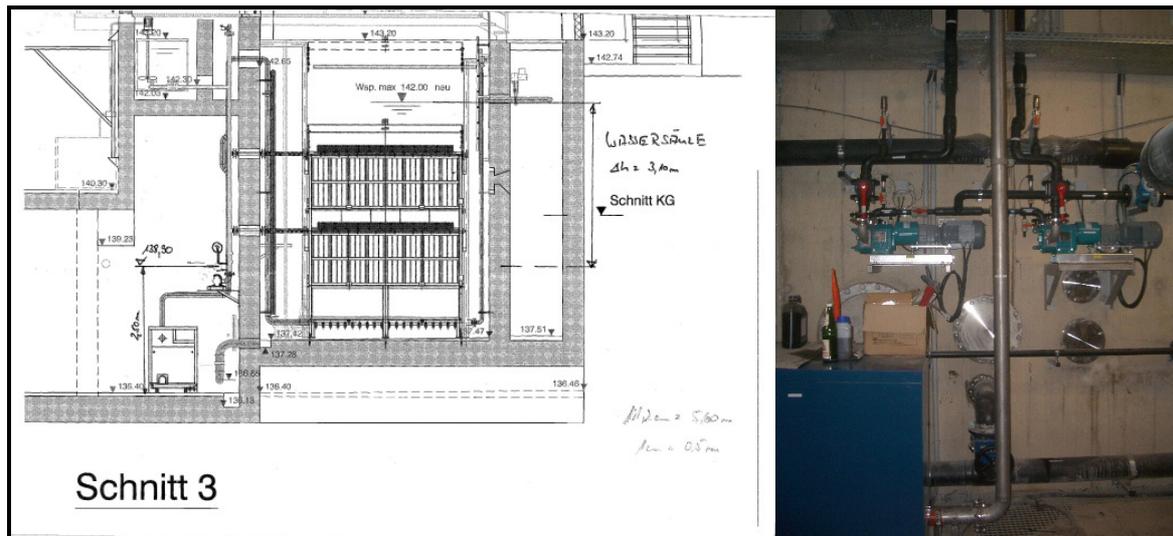
In der Summe verringerte sich der spezifische Energiebedarf, berechnet als kWh/m<sup>3</sup> zufließendes Abwasser, gem. Bild 3-10 von 1,7 (Phase I) auf nur 0,73 kWh/m<sup>3</sup> (Phase 7). Weiterhin ist festzustellen, dass die Schwankungen im spezifischen Energieverbrauch als Folge der Optimierungsmaßnahmen deutlich kleiner geworden sind.



**Bild 3-10:** Spezifischer Energieverbrauch in den sechs Betriebsphasen, mit Mittelwert und mittlerer Abweichung als Maß für die Streuung der Daten

### 3.2 Halbtechnische simas-Versuchsanlage

Zur praktischen Erprobung und Absicherung der Modellansätze wurden ergänzende Untersuchungen u. a. zur Reduzierung der CF-Luftmenge an der Kubota Membranschulungsanlage „simas“ des Aggerverband vorgenommen, die in Bild 3-11 dargestellt ist. Die simas-Anlage wird mit den Ablauf der Biologie der KA Seelscheid beschickt, so dass die für die Filtration maßgeblichen Schlammeigenschaften mit denen der KA Seelscheid identisch sind.



**Bild 3-11: SIMAS-Membranschulungsanlage (Kubota-Plattenmembran)**

Die technische Spezifikation der Anlage stellt sich u.a. wie folgt dar

- 1 Membranmodul Kubota EK 400 (320 m<sup>2</sup>)
- 2 Beckenvolumen: 60m<sup>3</sup>
- 3 Gebläse Aerzener GM 4 S mit Frequenzumformer (FU)
- 4 Drehkolbenpumpe Börger AL 25 (2) mit FU
- 5 Druckaufnehmer E&H
- 6 MID E&H

Die Standardluftmenge des CF-Gebläses einem Luftvolumenstrom von 240 m<sup>3</sup><sub>N</sub>/h. (Tabelle 3-3)

**Tabelle 3-3: Luftvolumenstrom in Abhängigkeit der Gebläsefrequenz**

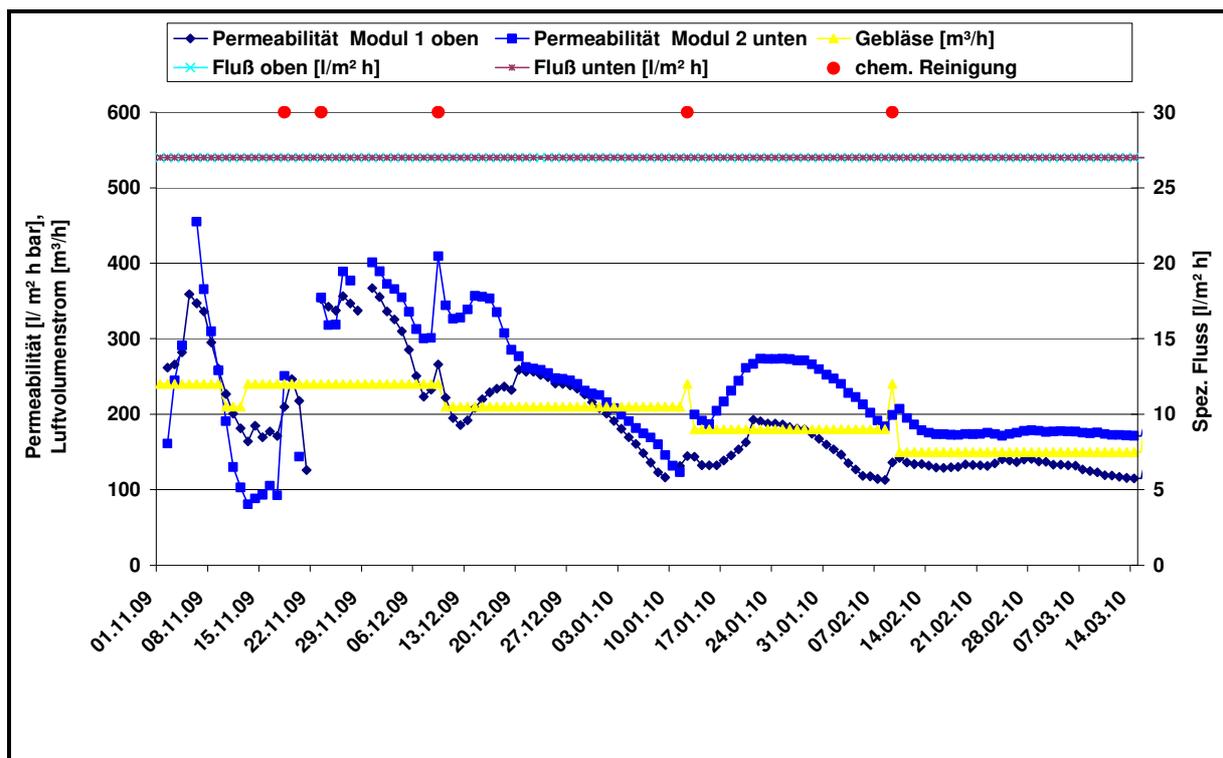
Gebläse Aerzener GM 4 S			
Frequenz			
Motor	Gebläse	Volumenstrom	Motor
[1/s]	[1/s]	[m <sup>3</sup> /h]	Übersetzung
50	62,5	240	1,25
45	56,25	210	1,25
40	50	180	1,25
35	43,75	150	1,25
30	37,5	114	1,25
25	31,25	85	1,25
20	25	60	1,25

\* Ansaugvolumenstrom bei p<sub>u</sub>  
Einblastiefe ca. 4,30 m  
Scheibe Motor 0,20 m, Scheibe Gebläse 0,16 m

Die Dokumentation der Versuchseinstellungen und die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Kapiteln aufgeführt.

### 3.2.1 Dauerbetrieb mit Bemessungsflux und Variation des CF-Luftvolumenstromes

Aufgrund anfänglicher verfahrenstechnischer Probleme konnten in den Monaten September bis Ende Dezember 2009 keine belastbaren Ergebnisse erzielt werden. In dem ersten Versuchsabschnitt ab Dezember 2009 sollte betrachtet werden, wie schnell die Permeabilität bei konstant hoher Flussrate und sukzessiver Reduktion des CF-Luftvolumenstroms abnimmt. Die durchschnittliche Flächenbelastung liegt in diesem Versuchsabschnitt bei  $27 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ . Als Vergleich werden in großtechnischen Anlagen über das Jahr gesehen Flächenbelastungen von  $5\text{-}10 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  erreicht. Die dargestellten Werte der Permeabilität sind Tagesmittelwert die aus Minutenwerten berechnet werden. Damit finden Tagesschwankungen keine Berücksichtigung. Die Gründe des unterschiedlichen Permeabilitätsniveaus zwischen oberer und unterer Modulebene konnten auch nach Analyse der hydraulischen Gegebenheiten und der Inspektion der Druckaufnehmer nicht ermittelt werden. Nach jeder Änderung der Versuchseinstellung wurde eine chemische Reinigung vorgenommen. Dies gilt für alle Versuchsabschnitte. Die in den nachfolgenden Grafiken dargestellten Permeabilitäten wurden nicht temperaturkompensiert.

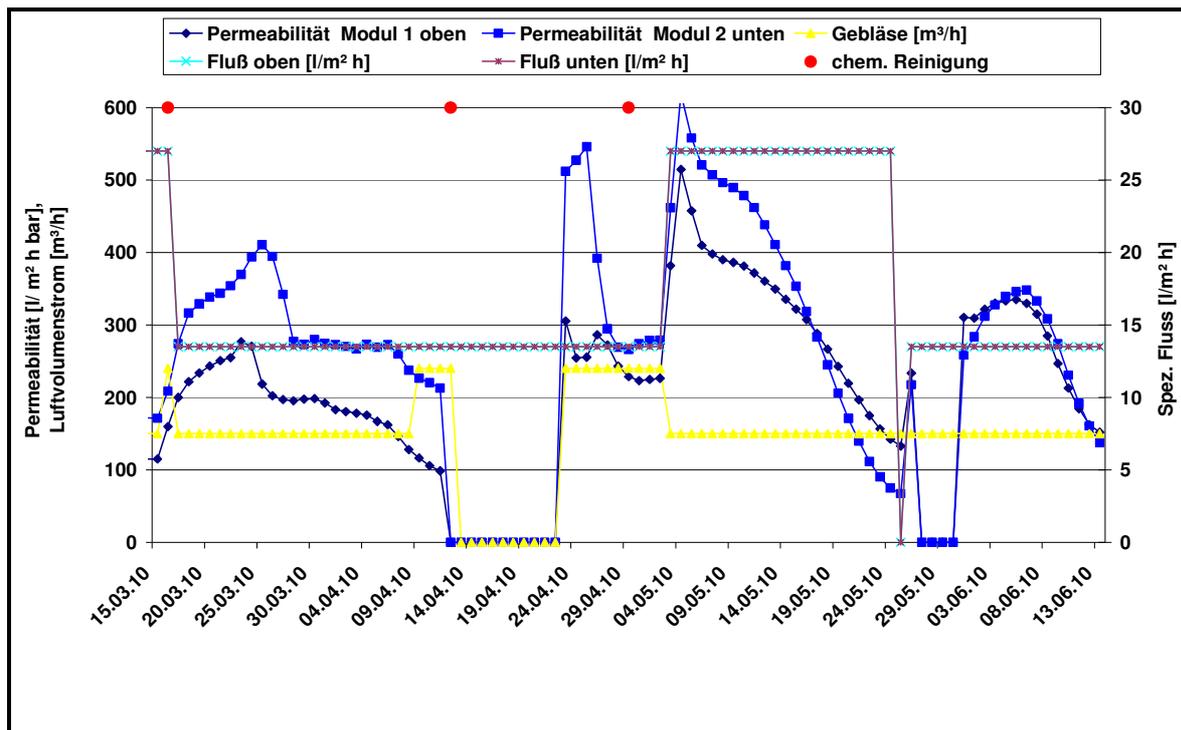


**Bild 3-12:** Variation des Luftvolumenstroms (Cross-Flow Belüftung) bei kontinuierlichem Filtratabzug (Bemessungsflux) des Versuchsabschnitts 1

Im Rahmen des ersten Versuchsabschnittes wurde der Luftvolumenstrom zur Cross-Flow Belüftung in einem Bereich von 150 ( $0,446 \text{ m}^3_{\text{N}}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ) bis  $240 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$  ( $0,750 \text{ m}^3_{\text{N}}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ) (bei konstantem Filtratabzug von  $27 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ) variiert. Der Filtratabzug erfolgte im Lauf/Relaxations-Intervall von 9/1 Minute konstant über 24 h/d. Es ist eine mit abnehmendem Luftvolumenstrom sinkende Permeabilität zu erkennen, die sich über den Versuchsverlauf auf ein konstantes mittleres Permeabilitätsniveau einpendelt. Bei einem CF-Luftvolumenstrom von  $150 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$  konnte dieses Niveau über fast vier Wochen beibehalten werden. (Bild 3-12)

### **3.2.2 Dauerbetrieb mit halbem Bemessungsflux und Variation des CF-Luftvolumenstromes**

Eine Halbierung des spezifischen Flusses auf ca.  $13 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  bei einem Luftvolumenstrom von  $150 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$  führt über zwei Wochen zu einem Anstieg der Permeabilität. Nach Erreichen des lokalen Permeabilitätsmaximums erfolgt trotz der Reduzierung des Flux ein starker Abfall der Permeabilität. Dies führte zum Abbruch des Versuchs. Nach kurzzeitigem maschinentechnischem Ausfall wurde die Filtration zunächst mit dem Bemessungsflux wieder in Betrieb genommen. Der Permeabilitätsverlauf weist dann wieder den typischen Sägezahnverlauf ab Mitte März auf. Als Ergebnis konnte für einen spezifischen Fluss von  $13 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  der Betrieb nur über drei bis vier Wochen (Mitte März bis Mitte April 2010 und Juni 2010) sichergestellt werden. Das hohe Permeabilitätsniveau nach der chemischen Reinigung Anfang Mai ist im Wesentlichen auf die beiden schnell aufeinander folgenden Reinigungen (Mitte April und Anfang Mai) zurückzuführen. (Bild 3-13)



**Bild 3-13:** Variation des Luftvolumenstroms (Cross-Flow-Belüftung) bei kontinuierlichem Filtratabzug (halber Bemessungsfluss) des Versuchsabschnitts 2

Die Halbierung des spezifischen Flusses von 26 auf 13 l/(m<sup>2</sup>·h) und eine Reduzierung des CF-Luftvolumenstroms auf 150 m<sup>3</sup><sub>N</sub>/h führte zu keinem stabilen Anlagenbetrieb. Großtechnische Membranbelebungsanlagen werden i.d.R. mit einer über das Jahr mittleren Flächenbelastung von 5-10 l/(m<sup>2</sup>·h) betrieben (KA Seelschied: 6 l/(m<sup>2</sup>·h)). Dies lässt zumindest die Vermutung zu, dass die Relaxations- und Pausenphasen eine wesentliche Einflussgröße auf den Permeabilitätsverlauf darstellen. Im Weiteren soll diese Einschätzung im Rahmen des „Ganglinienbetriebs“ verifiziert und das Potenzial im Vergleich zum kontinuierlichen Betrieb quantifiziert werden.

### 3.2.3 Dauerbetrieb mit gangliniengesteuerten Flux und Variation des Luftvolumenstroms

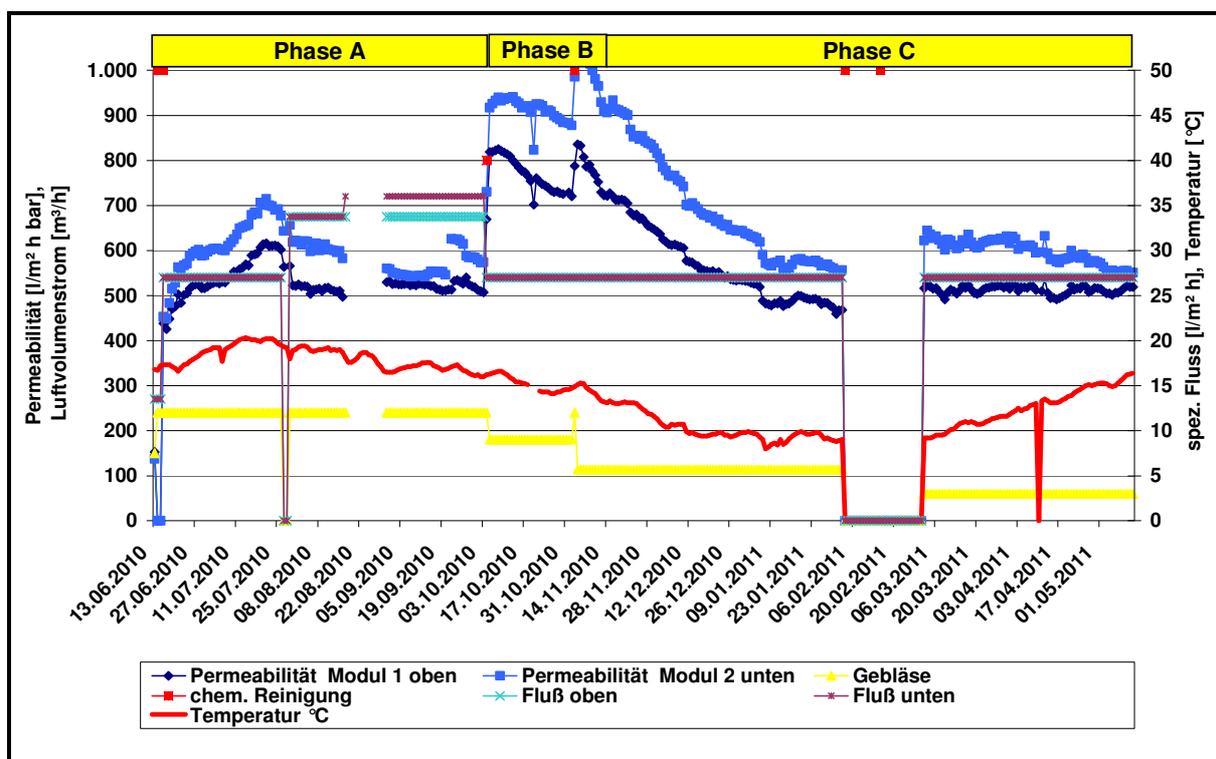
Um einen Vergleich mit typischen Belastungsverhältnissen mit großtechnischen Anlagen zu haben, wurde eine repräsentative Gangliniensteuerung proportional zur KA Seelschied erstellt, die zur Steuerung der Filtration herangezogen wird. Diese wird in einem festgelegten Zeitintervall (täglich) wiederholt. Damit wird sichergestellt, dass zumindest die hydraulische Belastung der Membranen in den einzelnen Versuchsabschnitten weitgehend vergleichbar ist. Beim Vergleich der Ergebnisse von kontinuierlichem Filtratabzug und Filtration gemäß der Gangliniensteuerung ist das um den Faktor 2-3 höhere Permeabilitätsniveau des Ganglinienbetriebs zu erkennen. Proportional ist die Flächenbelastung im Ganglinienbetrieb

um etwa 2,5 bis 4,5 geringer. Die Relaxations- und Pausenzeiten stellen wesentliche Größen zur Beeinflussung der Permeabilitätsverläufe dar.

Somit lässt sich eine möglich definierbare filtrierbare Abwassermenge in einem normalen Betriebsparameterbereich zwischen zwei chemischen Reinigungen interpretieren. Bei der großtechnischen Membranbelebungsanlage liegt diese bei etwa  $6 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ .

- Intervall zwischen zwei chemischen Reinigungen: 4.350 h  
 $6 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \cdot 4.350 \text{ h} = 26.100 \text{ l}/\text{m}^2$

Diese  $26.100 \text{ l}/\text{m}^2$  werden bei kontinuierlichem Betrieb mit einem Nettofluss von  $27 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  nach etwa 970 h bzw. 40 Tagen erreicht.



**Bild 3-14:** Variation des Luftvolumenstroms (Cross-Flow Belüftung) bei einem Filtratabzug nach Ganglinie (mittlere Flächenbelastung  $6 \text{ l}/\text{m}^2 \text{ h}$ ) des Versuchsabschnitts 3

Aus den Versuchen (Phase A) mit einer Erhöhung des Flusses auf ca.  $35 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  (Anfang August bis Anfang Oktober) wird deutlich, dass die aufzubringende Triebkraft schneller steigt als der Fluss, die Permeabilität also abnimmt (Modul unten). Der Permeabilitätsverlauf zeigt über einen Zeitraum von vier Wochen keinen wesentlichen Abfall auf, so dass diese Einstellung für die Filtration von hydraulischen Spitzenbelastungen durchaus nutzbar ist.

Nach der Reduzierung des Flux (Phase B) von 35 bzw.  $37 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  auf  $27 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  liegt das Permeabilitätsniveau in einem Bereich von 800 bis  $900 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{bar} \cdot \text{h})$  über einen Zeitraum von

etwa vier Wochen (Anfang Oktober bis Anfang November) (Bild 3-14). Diesen Versuchen liegt ein Cross-Flow Volumenstrom von  $180 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$  zu Grunde. Die Ergebnisse dieses Versuchsabschnitts lassen auf ein gutes Potenzial zur Reduzierung des Cross-Flow Volumenstrom schließen.

Im Zeitraum Anfang November 2010 bis Ende Januar 2011 (Phase C) erfolgte eine weitere Reduzierung des CF-Luftvolumenstroms. Zur Vorbereitung dieses Versuchsabschnitts wurde eine chemische Reinigung durchgeführt. Der Cross-Flow Volumenstrom wurde hier auf ca.  $115 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$  reduziert. Bild 3-14 zeigt den „positiven Permeabilitätsverlauf“ in diesem Versuchsabschnitt. Der sehr günstige Permeabilitätsverlauf des Membranmoduls über knapp drei Monate mit einer Stabilisierung der Permeabilität bei  $500\text{-}600 \text{ l}/(\text{m}^2\cdot\text{bar}\cdot\text{h})$ , mit einer dem Temperaturverlauf folgenden leichten Steigerung, lässt das Potenzial auf eine großtechnische Überprüfung dieser Einstellung über einen Zeitraum von einem halben Jahr (jetziges Intervall zwischen zwei chemischen Reinigungen) erkennen. Selbst die weitere Reduzierung des Cross-Flow Luftvolumenstroms auf etwa  $60 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$  pro Membranmodul scheint nach den Ergebnissen der ersten zwölf Betriebswochen mit einer Permeabilität von ca.  $500 \text{ l}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{bar})$  möglich. (Bild 3-14)

Das energetische Einsparpotenzial der großtechnischen Membranbelebungsanlage Seel-scheid bei Reduzierung des Luftvolumenstromes von derzeit etwa  $170 \text{ m}^3/\text{h}$  auf etwa  $115 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$ , unter der Maßgabe ein entsprechend ausgelegtes Gebläse zu nutzen, beträgt theoretisch:

Durchschnittliche Laufzeit pro Gebläse:	1.600 h/	
Typ:	Kaeser EB 290 C	
Volumenstrom $7 \times 170 \text{ m}^3/\text{h}$	$1.190 \text{ m}^3/\text{h}$	
Wellenleistung	22,4 kW	(3 % Riemen/ 9% Motor)
Anschlussleistung:	25,4 kW	
Typ:	Kaeser DB 236 C	
Volumenstrom $7 \times 115 \text{ m}^3/\text{h}$	$805 \text{ m}^3/\text{h}$	
Wellenleistung	15 kW	(3 % Riemen/ 9% Motor)
Anschlussleistung:	17 kW	
<b>Gesamtstromdifferenz:</b>	<b><math>8,4 \text{ kW} \times 6 \times 1.600 \text{ h/a} = 80.640 \text{ kWh}</math></b>	
	<b><math>\sim 80.640 \text{ kWh}/650.000 \text{ m}^3/\text{a} = 0,12 \text{ kWh}/\text{m}^3</math></b>	

### 3.2.4 Filtratabzug ohne Cross-Flow Luftvolumenstrom

Dieser Versuchsabschnitt wurde zur Generierung von Betriebsdaten für betriebliche Grenzfälle herangezogen, die für die Entwicklung des Simulationsmodells erforderlich waren. Der Test zur Membranfiltration ohne gleichzeitige Cross-Flow-Belüftung führte wie erwartet, zu einem raschen Abfall der Permeabilität und dem Erreichen des Abschaltsdrucks von 600

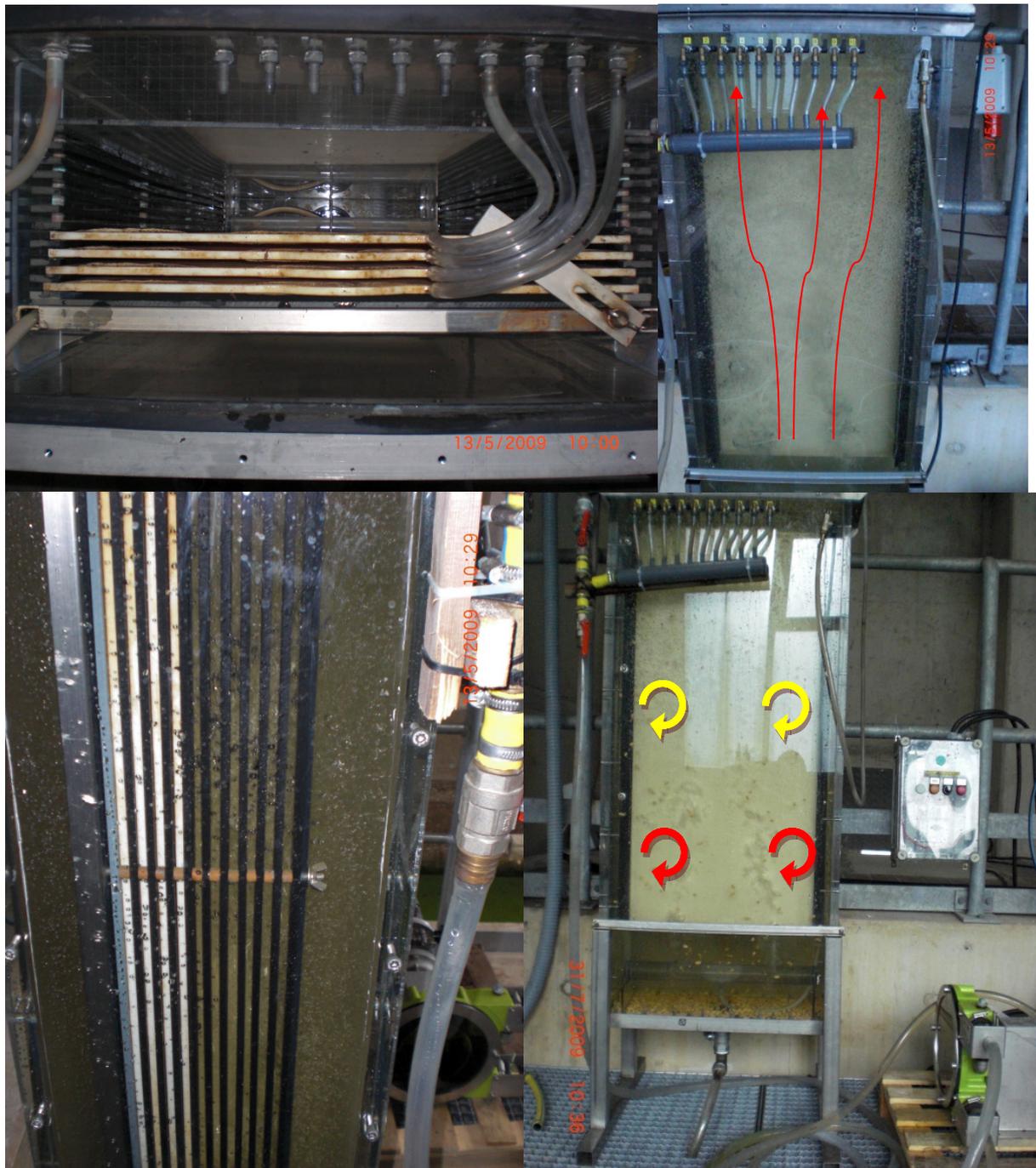
mbar innerhalb weniger Filtrationszyklen (9 Min/1 Min). Erwartungsgemäß bildet sich der Filterkuchen auf den Membranen (Deckschicht) rasch aus. Bei der anschließenden Inaugenscheinnahme der Membranen zeigte sich, dass der Belebtschlamm zwischen dem gesamten Plattenzwischenraum anlagerte, so dass dieser mechanisch entfernt werden musste. Im Vergleich zu Deckschichten, die sich im belüfteten Betrieb über Wochen/ Monate einstellen, ist hier der spez. Filtrationswiderstand je  $\mu\text{m}$ -Deckschicht deutlich geringer. Bild 3-15 zeigt eine Aufnahme der verblockten Platten, infolge eines Permeatabzugs ohne Cross-Flow-Belüftung.



**Bild 3-15: Verblockte Membranplatten - Zwischenräume komplett mit Biomasse zugesezt**

### 3.2.5 Tracerversuch und Deckschichtablösung/ - austrag

Anhand eines Tracerversuchs (Zugabe von Farbstoff in das Filtrat) erfolgte die Visualisierung der Durchdringung von Reinigungsmitteln bei der chemischen Reinigung. Es konnte bei der Durchführung dieser Untersuchungen am Plexiglasmodul gezeigt werden, dass sich die Membranen bei der chemischen Reinigung fast vollflächig berühren. Die Tracerflüssigkeit trat überall gleichmäßig und gut sichtbar im Randbereich der Membranplatte (hier berühren sich die Membranen nicht) aus. Eine Rückspülung der Module mit Filtrat (ohne Chemikalien) kann somit nur wirkungsvoll sein, wenn sich die Intervalle der Rückspülung häufiger mit Zeiten der Cross-Flow-Luftvolumenströmung abwechseln. Insbesondere dem geeigneten CF-Luftvolumenstrom kommt nach jedem Reinigungsschritt eine besondere Bedeutung zu. Dieser beeinflusst die Ablösung und den sicheren und umfassenden Austrag der abgelösten Deckschicht aus dem Plattenzwischenraum. Wie an dem Plexiglasmodul im kleintechnischen Maßstab erkennbar war, bilden sich in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms an unterschiedlichen Stellen Totzonen und auch Wirbel zwischen den einzelnen Membranplatten aus. In diesen Bereichen werden Partikel der abgelösten Deckschicht nicht oder nur ungenügend aus dem Membranplattenzwischenraum ausgetragen.



**Bild 3-16: Rückspül- und Cross-Flow-Volumenstromversuche am Plexiglasmodul**

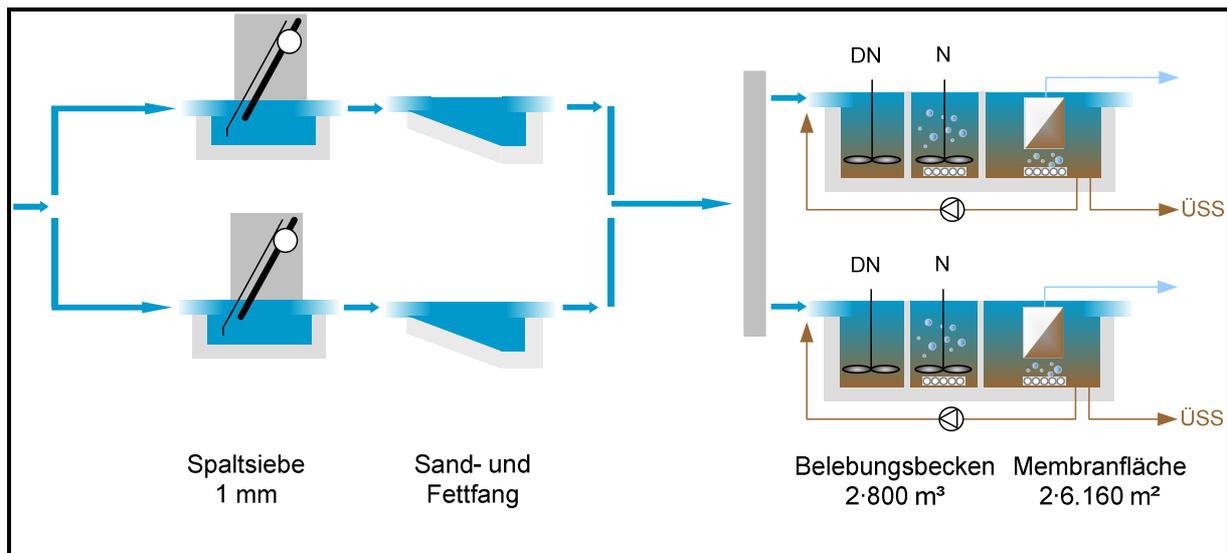
Da es sich bei dem kleintechnischen Plexiglasmodul nicht um eine repräsentative, mit dem großtechnischen Modul vergleichbare Anlagenkonfiguration handelt, können die Ergebnisse und Schlussfolgerungen für ein großtechnisches Modul ggf. anders ausfallen. Dennoch lässt sich eine zwei- oder dreistufige Cross-Flow-Luftvolumenüberströmung nach jeder chemischen Reinigung vergleichsweise einfach durch das getaktete Anpassen des FUs erreichen. Dieser Ansatz ist gemäß den positiven Ergebnissen bei der Reduzierung des Cross-Flow-

Volumenstroms auch auf den normalen Filtrationsprozess zu übertragen. Neben der Energieeinsparung durch einen reduzierten Luftvolumenstrom werden durch variierende Strömungsverhältnisse zwischen den Platten vollflächige Scherbeanspruchungen der gesamten Membranoberfläche erwartet. Einflüsse aus den sonstigen Strömungsverhältnissen im Membranbelebungsbecken (z.B. Zu- und Ablauf, etc.) konnten hier nicht erfasst werden.

### **3.3 KA Monheim**

Die Membranbelebungsanlage Monheim (9.700 EW) wurde zweistraßig mit vorgeschalteter Denitrifikation und vier nachgeschalteten Membrankammern ausgeführt und ist seit Juli 2003 in Betrieb. Die mechanische Abwasserreinigung geschieht mittels einem 1 mm-Spaltsieb und belüftetem Längssandfang mit Schwimmstoffabscheidung. Im Rechengebäude sind dazu zwei parallele Kompaktanlagen installiert, die jeweils 75 % des Mischwasserzuflusses bewältigen können. Um Verzopfungen der Membranen zu vermeiden, haben die Siebe keinen Notumlauf. Es wurde eine Art dreikammeriger Aufbau mit vorgeschalteter Denitrifikation (2·340 m<sup>3</sup>), Nitrifikation (2·340 m<sup>3</sup>) und nachgeschalteten Membrankammern (4·75 m<sup>3</sup>) gewählt. Das Membrankammervolumen wirkt dabei als Nitrifikationsraum mit. Abzüglich der Verdrängung durch Einbauten ergab sich ein Gesamtvolumen der Belebung von 1.600 m<sup>3</sup>. (Bild 3-17)

In jeder Filtrationskammer sind sieben Membrankassetten mit jeweils 440 m<sup>2</sup> Membranfläche installiert (gesamt 12.320 m<sup>2</sup>) und ein Nachrüstungsplatz für jeweils eine zusätzliche Kasette freigehalten. Die Zuläufe werden über eine Verteilerrinne vom Belebungsbecken hydraulisch entkoppelt. Diese Verteilerrinne dient der wahlweisen Beschickung der einzelnen Filtrationskammern und zugleich auch dem Schwimmschlammabzug.



**Bild 3-17: Fließschema der KA Monheim**

Zur Filtration eingesetzt werden Hohlfasermembranen des Typs ZeeWeed 500c der Fa. Zenon (drei Straße mit je 3.520 m<sup>2</sup>) sowie seit Herbst 2008 mit Filtrationseinheiten der Fa. Koch Typs PURON (eine Straße mit 3.000 m<sup>2</sup>). Der maximale Netto-Flux beträgt 23,4 l/m<sup>2</sup>·h, der Brutto-Flux während des Permeatabzugs errechnete sich zu 31,1 l/m<sup>2</sup>·h. Aus dem mittleren Rohabwasserzufluss der Anlage von 2.350 m<sup>3</sup>/d ergab sich bis zum Herbst 2008 eine mittlere hydraulische Belastung der Membranen von 8,8 l/m<sup>2</sup>·h.

Auf den Einsatz chlorhaltiger Chemikalien zur Reinigung der Membranen wird konsequent verzichtet. Alle Zwischen- und Intensivreinigungen erfolgen mit Wasserstoffperoxid und Zitronensäure.

### **Permeabilitätsentwicklung der KA Monheim für die Jahre 2004 bis 2008**

Ausgehend von einer Schlammtemperatur von 20°C und einer gemessenen Permeabilität von rund 200 l/(m<sup>2</sup>·h·bar) nahmen die Permeabilitäten im Sommer im Laufe der sechsjährigen Nutzungszeit auf ca. 125 l/m<sup>2</sup>·h·bar deutlich ab. Einen ähnlichen Verlauf nahmen die Werte für die kälteren Jahreszeiten (Bild 3-18).

Grundlegende Betrachtungen und Annahmen zur Viskosität des Wassers sowie verschiedene Untersuchungen dieses Effektes auf die Technologie der Membranfiltration (Joss et al., 2008) ermöglichen eine temperaturbezogene Kompensation gemessener Permeabilitäten nach Trussel et al. (2005). Um die in Monheim typischen Temperaturunterschiede rechnerisch zu kompensieren, wurden die Permeabilitäten auf eine Basistemperatur von 20°C umgerechnet. (Bild 3-19)

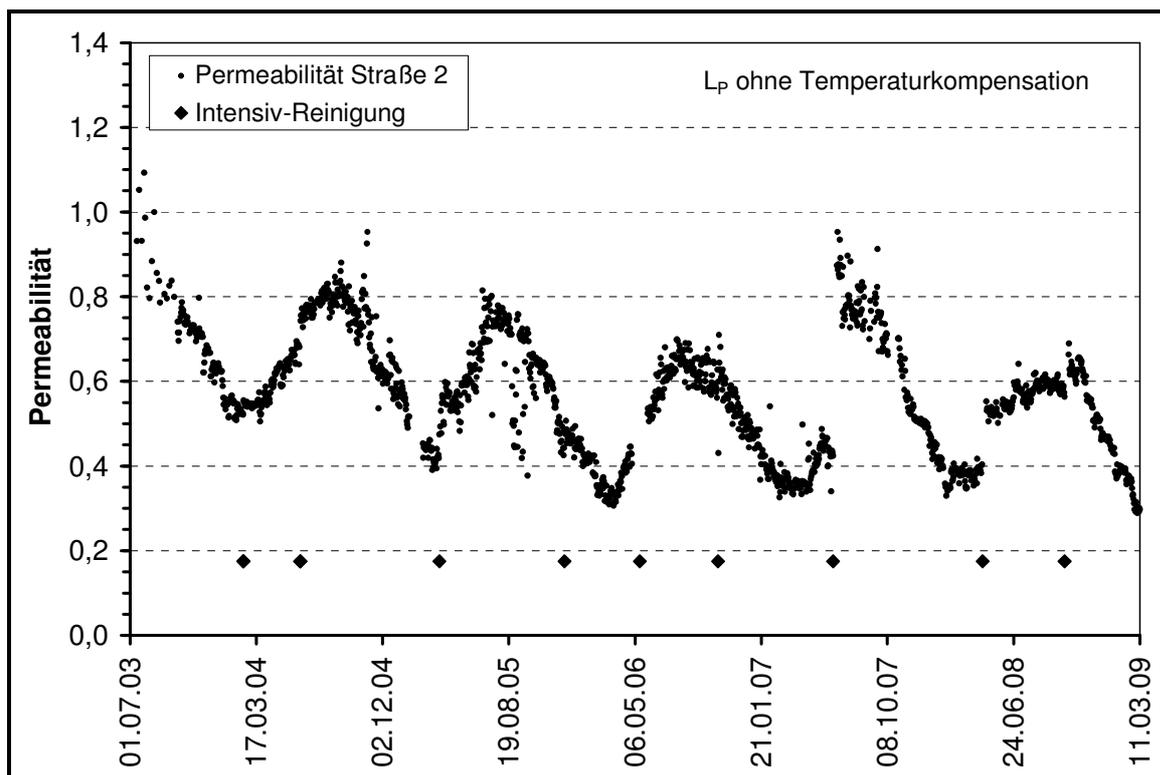


Bild 3-18: Permeabilität der Straße 2, ohne Berücksichtigung der Viskosität

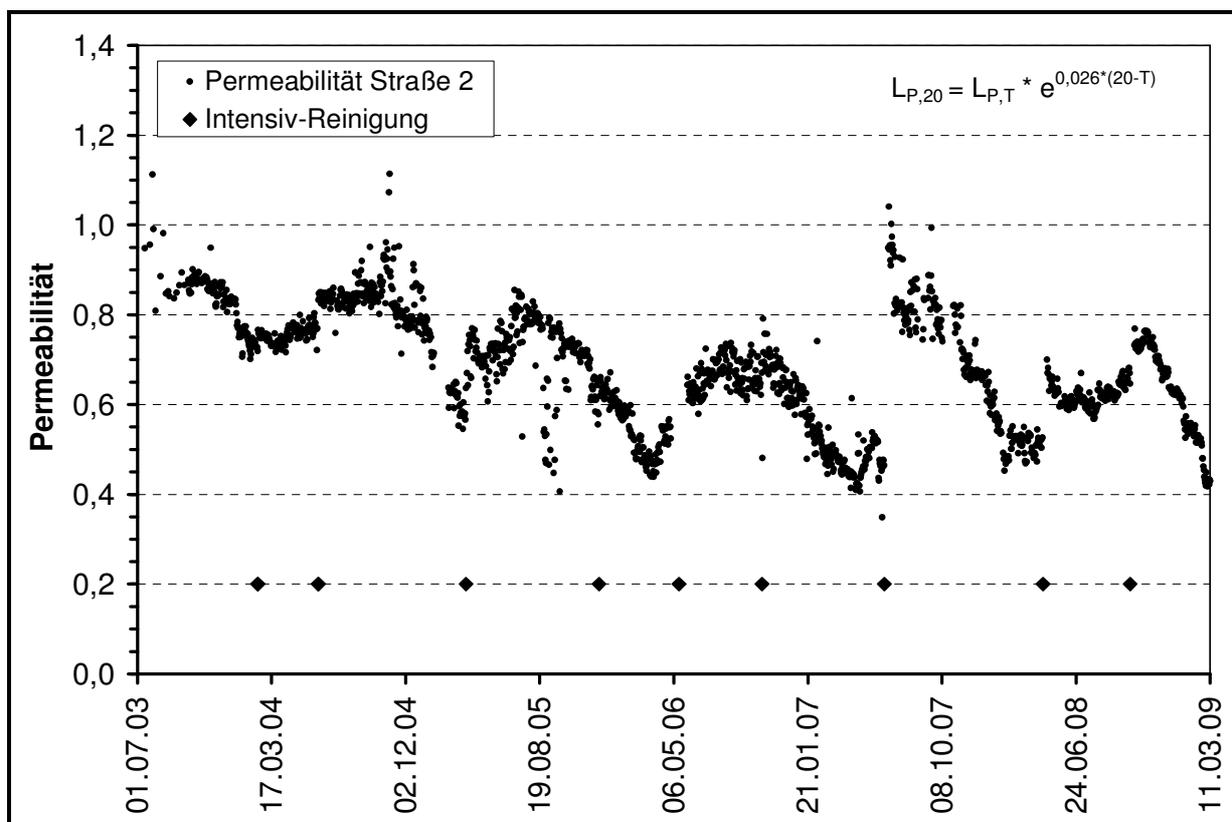


Bild 3-19: Permeabilitäten der Straße 2, auf 20 °C bezogen

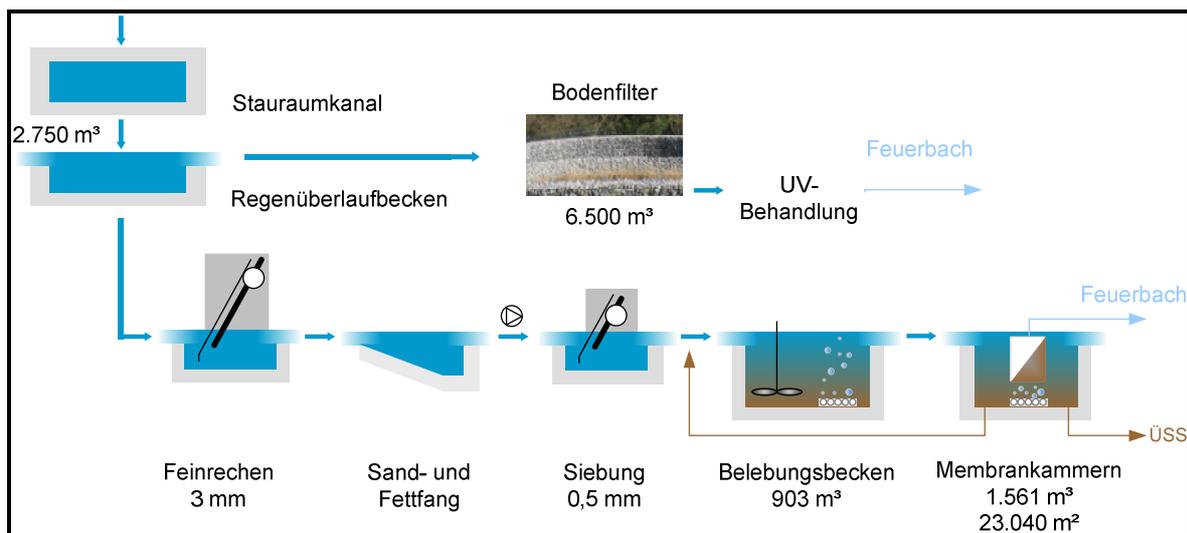
Aus dem Verlauf der um die Viskosität rechnerisch temperaturkorrigierten Permeabilitäten lassen sich nach Bild 3-19 verschiedene Feststellungen ableiten: Im Laufe der sechs Betriebsjahre ergab sich anfangs eine schnellere, mit zunehmender Betriebszeit aber deutlich verlangsamte Abnahme der Permeabilitäten. Zudem besteht auch mit Berücksichtigung der Viskosität zwischen den Werten im Sommer und im Winter wiederkehrend und regelmäßig eine sich im Laufe der Jahre zunehmend ausprägende Differenz, von bis zu  $70 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$ , die sich mit hoher Wahrscheinlichkeit aus den unterschiedlichen Filtrationsfähigkeiten bzw. den mikrobiologischen Charakteristika des belebten Schlammes ergeben muss.

Die auf der MBR Monheim bestimmten Permeabilitäten werden im Wesentlichen durch drei dynamische Effekte bestimmt: Im Laufe der Membranbetriebszeiten stellt sich eine gewisse werkstoffbezogene Alterung bzw. ein bezogen auf die in Monheim möglichen Regenerationen irreversibles Fouling der Membranen ein. Die hierdurch bewirkte Leistungsabnahme war mit neuen Membranen deutlich ausgeprägter und nahm im Laufe der Zeit erheblich ab. Darüber hinaus bestimmt die durch die Temperaturen beeinflusste Viskosität die aktuellen Leistungen. Des Weiteren wurde nachgewiesen, dass sich die Filtrationsfähigkeit des belebten Schlammes wahrscheinlich aufgrund mikrobiologischer Änderungen nach Phasen mit niedrigen Temperaturen erheblich verschlechtert.

Insbesondere den tiefen und lang anhaltenden Temperaturen ist dabei eine tragende Rolle zuzuweisen, da diese neben der Viskosität auch die Konzentration von Polysacchariden und Proteinen (sog. EPS) beeinflussen (Rosenberger u.a., 2006) und zudem die Stickstoffoxidation bzw. –elimination beeinflussen (Drews u.a., 2007). Messungen der EPS-Konzentrationen in Monheim ergaben ein eher konstant niedriges EPS-Niveau im Rohabwasser sowie im belebten Schlamm (Wedi u.a., 2007). Unklar ist dabei noch, ob sich auch die Charakteristik gelöster EPS saisonal unterscheidet. Der direkte Vergleich publizierter Ergebnisse wird durch die voneinander abweichende Analytik zu den gelösten mikrobiologisch erzeugten Produkten erheblich erschwert.

### **3.4 KA Konzen**

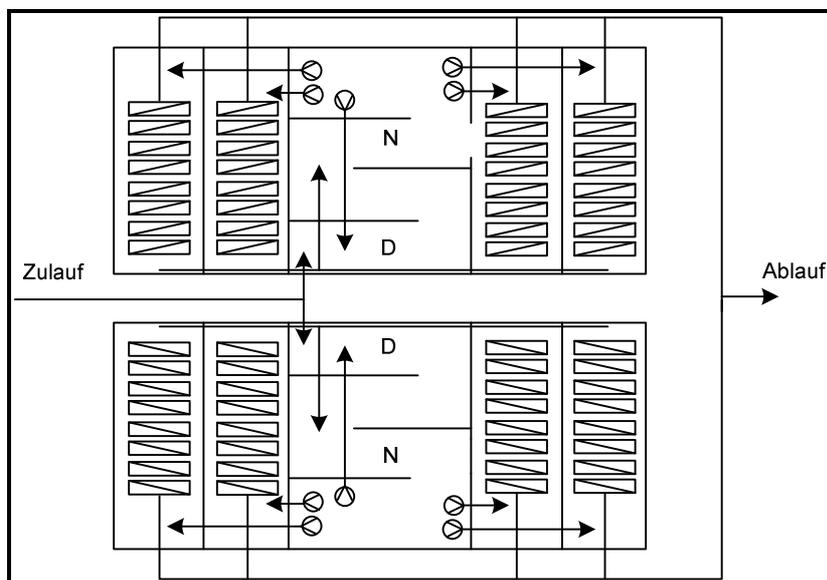
In der vom WVER betriebenen und 2006 als MBR in Betrieb genommenen Kläranlage hat eine Anschlussgröße von 9.700 E. Der Kläranlage ist eine Mischwasserbehandlung vorgeschaltet. Das Fließschema der KA Konzen ist in Bild 3-20 dargestellt.



**Bild 3-20: Fließschema der KA Konzen**

Die mechanische Reinigung umfasst 2 Feinrechen als Filterstufenrechen mit einem Stababstand von 3 mm, einem 1-straßigen belüfteten Sandfang mit Fettfang sowie eine Siebung, bestehend aus 8 Feinstrechen. Die Siebung ist als Filterstufenrechen mit einem Stababstand von 0,5 mm ausgeführt und wird kontinuierlich beschickt.

Ein detailliertes Fließschema der Belebungsstufe und des MBR ist in Bild 3-21 dargestellt.



**Bild 3-21: Fließschema von Belebungsbecken und Membrankammern der KA Konzen (Hübner und Rolfs, 2007)**

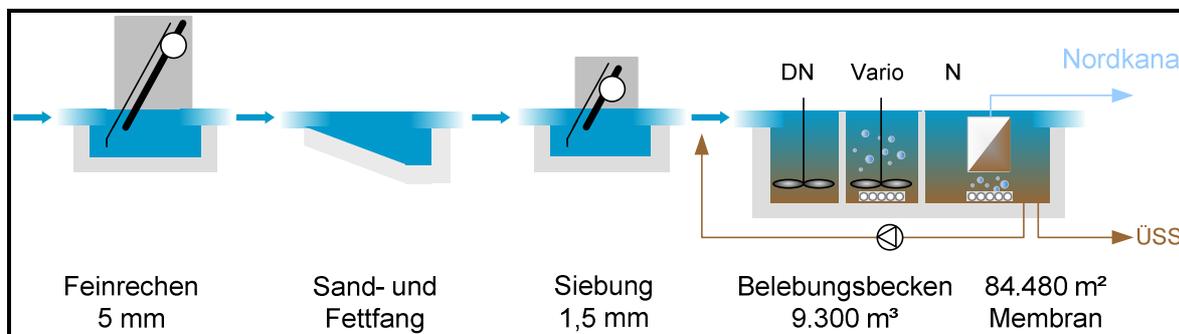
Von der Siebung gelangt das Abwasser in den Zulaufverteiler der beiden Belebungsbecken. Diese weisen ein Gesamtvolumen von 903 m³ auf. Am Auslaufbereich ist je eine Rezirkulationspumpe installiert, die das Abwasser wieder in den Einlaufbereich fördert. Die gesamten Belebungsbecken sind mit Plattenbelüftern vollflächig ausgestattet, wobei jedes

Becken in zwei separat absperrbare Belüftungszone unterteilt werden kann, so dass eine belüftete und eine unbelüftete Zone entstehen.

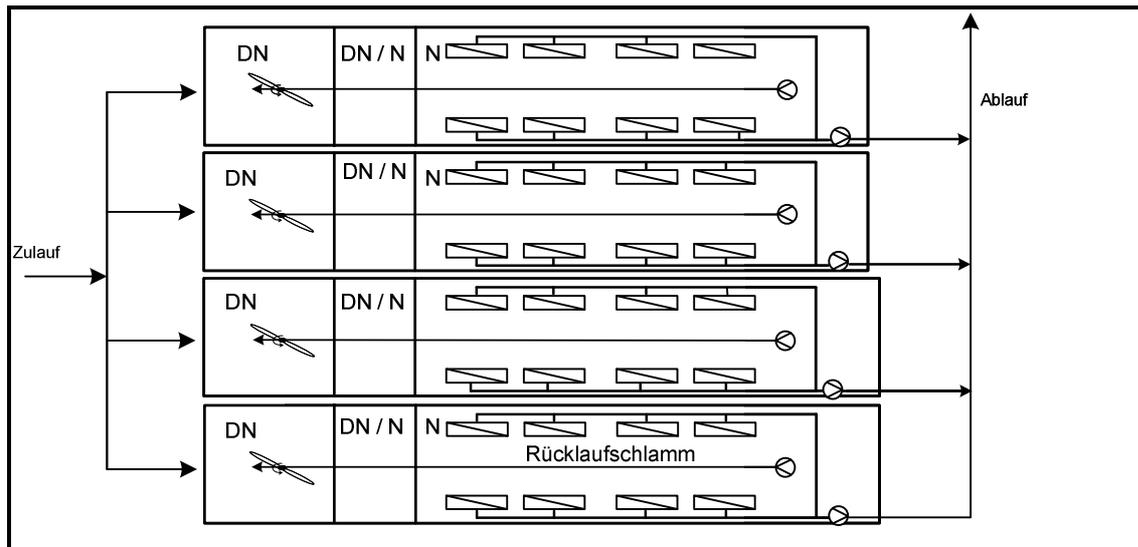
Die Phosphorfällung mit Natriumaluminat erfolgt wahlweise im Zulauf zum Sandfang oder ins Belebungsbecken. Vom Ende des Belebungsbeckens aus wird das Abwasser durch je vier Rezykulationspumpen auf die insgesamt acht Membrankammern mit einem im Verhältnis zum Belebungsbecken recht großen Volumen von 1.561 m<sup>3</sup> verteilt. Das Gesamtvolumen der biologischen Stufe beträgt somit 2.464 m<sup>3</sup>. Über Überfallkanten fließt das Abwasser-Schlamm-Gemisch durch die Rücklaufrinnen wieder in die Belebung. In jeder Membrankammer befinden sich zwei Permeatpumpen und neun Doppelstockmodule der Firma Kubota (EK400). Somit steht eine Membranfläche von 23.040 m<sup>2</sup> zur Verfügung. Jedem Becken ist ein Gebläse für die nötige Membranbelüftung zugeordnet. Das Filtrat wird in den Feuerbach eingeleitet.

### 3.5 KA Nordkanal

Das Gruppenklärwerk Nordkanal wird seit 2004 vom Ertftverband betrieben und hat eine Ausbaugröße von 80.000 E. Das Fließschema der KA Nordkanal ist in Bild 3-22 dargestellt. Die Zuleitung des Abwassers erfolgt über zwei Pumpwerke. Es passiert zunächst einen Feinrechen mit einem Stababstand von 5 mm. Dieser ist als zwei-straßiger Filterstufenrechen ausgebildet. Anschließend durchläuft das Abwasser einen zwei-straßigen belüfteten Sand- und Fettfang. Die mechanische Reinigungsstufe umfasst weiterhin eine Siebung, in der zwei parallele Siebtrommeln angeordnet sind.



**Bild 3-22: Fließschema der KA Nordkanal**



**Bild 3-23: Fließschema des MBR in Nordkanal**

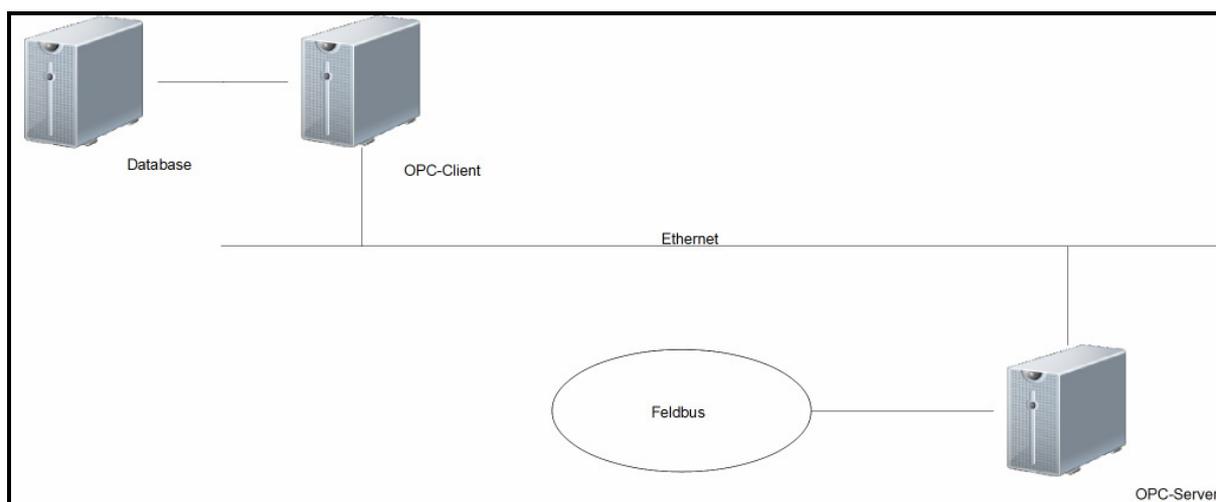
Die Belebungsstufe ist vier-straßig ausgebildet und umfasst je eine vorgeschaltete Denitrifikationszone, eine Variozone sowie eine Nitrifikationszone mit integrierter Membranfiltration (Bild 3-23).

Insgesamt stehen 9.300 m<sup>3</sup> für die biologische Abwasserreinigung zur Verfügung. Die Membranen sind in den Nitrifikationsbereich integriert. Es handelt sich um Membranen der Firma Zenon mit einer Gesamtoberfläche von 84.480 m<sup>2</sup>. Neben einer feinblasigen Belüftung (Sauerstoffversorgung für die Nitrifikation) findet eine grobblasige Belüftung unterhalb der Membranmodule (Deckschichtkontrolle) statt. Zur Vermischung sind vier Rührwerke in jedem Nitrifikationsbecken eingebaut. Das Filtrat wird in den Nordkanal eingeleitet, der nur eine geringe natürliche Wasserführung mit niedriger Fließgeschwindigkeit hat und in den Rhein mündet.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Datenaufnahme, -verarbeitung und –auswertung

Damit die Daten von den einzelnen Messstellen verarbeitet und ausgewertet werden können, bedarf es einer umfassenden Informationsstruktur. Als Standardschnittstelle zum Austausch von Messdaten wird auf kommunalen und industriellen Anlagen hauptsächlich Object Linking and Embedding for Process Control (OPC) eingesetzt. Dies hat den Vorteil, dass Sensoren, Regler und Steuerungen verschiedener Hersteller ein gemeinsames, flexibles Netzwerk bilden. Wie in Bild 4-1 dargestellt, wird die Feldbus-Ebene mit einem OPC-Server verbunden, um die Daten direkt aus der Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) auszulesen. Ein OPC-Client greift auf diesen Server zu und speichert die Messwerte in einer Datenbank, wie bspw. PostgreSQL oder Microsoft SQL Server (MSSQL). Am Anfang des Projektes haben sich die Projektpartner auf einen MSSQL-Server für die Messwertarchivierung festgelegt, da sie sich in der gewohnten Windows-Umgebung leichter zurechtfinden konnten. Dieses System ist aber durch eine alternative relationale Datenbank leicht austauschbar.



**Bild 4-1: Aufbau der Feldbus-Ebene und die OPC-Anbindung**

Mit diesem Konzept werden seit November 2008 auf der Membrankläranlage Seelscheid 77 Messgrößen im Minutentakt aufgezeichnet, um die Prozesse einer Membrankläranlage zu identifizieren. Messorte sind hierbei die Becken der Biologie, die drei Membranstraßen, der Ablauf der Kläranlage sowie der Ablauf der Vorklärung. Zur Analyse des Zulaufs wurden eine spektrometrische Sonde für den chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) und Nitrat ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) von der Fachhochschule Köln sowie ein Amtax Analyser für Ammoniumstickstoff ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) des Aggerverbandes im Ablauf der Vorklärung installiert.

Aufgrund der hohen Zahl der Messgrößen ist eine zuverlässige Datenaufzeichnung unerlässlich. Deshalb wurde parallel zum bereits vorhandenen Prozessdatenverarbeitungssystem (PDV) des Aggerverbandes ein Serversystem aufgebaut, das direkt mit der Steuerung der Kläranlage verbunden ist und alle erfassten Messgrößen der Kläranlage aufzeichnet.

Damit die Projektpartner online auf die aufgezeichneten Daten zugreifen und diese visualisieren können, wurde die plattformübergreifende Software GECOC-C DB auf Basis von OpenOffice entwickelt. Wie in Bild 4-2 dargestellt, bietet die Software neben einer sekundengenauen Aufzeichnung von Messwerten verschiedene Analyse- und Visualisierungsmöglichkeiten.

The screenshot shows the GECOC-C DB software interface. At the top, there is a header bar with columns A through L. Below this, there is a form for entering a 'Versuchsreihe' (test series) name and a 'Starten' (start) button. To the right, a 'Messdaten anzeigen' (show measurement data) menu is open, listing options like '07.04.2009 Thomas Ludwig', 'Einstellen Straße 1', 'Kontrolle 27.3.09', 'Einstellen der Schieber', and 'Regenwetterzulauf 22.12.08'. Below the menu, a table displays 'Aktuelle Werte aus der Versuchsreihe für die Membranbioreaktor - Straße' (current values from the test series for the membrane bioreactor - street). The table has columns for 'Datum', 'Druck OR', 'Druck UL', 'Füllstand 1', 'Füllstand 2', 'O2', 'pH', 'Temperatur', 'TS', 'Udruck OL', 'Udruck UR', and 'Druck Verglm.'. The data rows show measurements from 04.12.2008 at 11:10:46 to 14:26:57.

Datum	Druck OR	Druck UL	Füllstand 1	Füllstand 2	O2	pH	Temperatur	TS	Udruck OL	Udruck UR	Druck Verglm.
04.12.2008 11:10:46	-89,13	32,36	91,88	91,73	5,68	7,01	11,66	12,26	12,21	-57,39	-83,64
04.12.2008 14:27:03	-3,05	27,47	89,68	89,56	1,27	6,97	11,61	11,94	0,00	24,42	-191,09
04.12.2008 14:27:02	-4,88	26,25	89,68	89,53	1,27	6,97	11,61	11,93	3,66	28,08	-197,80
04.12.2008 14:27:01	-1,22	26,86	89,68	89,56	1,27	6,97	11,61	11,93	-6,11	26,86	-194,75
04.12.2008 14:27:00	-3,66	26,25	89,68	89,56	1,28	6,97	11,61	11,93	0,00	26,86	-185,59
04.12.2008 14:26:59	-2,44	26,25	89,68	89,53	1,28	6,97	11,61	11,93	-3,05	26,25	-188,64
04.12.2008 14:26:58	-3,05	32,36	89,68	89,53	1,28	6,97	11,61	11,93	0,00	25,03	-194,14
04.12.2008 14:26:57	-5,49	28,69	89,68	89,56	1,29	6,97	11,61	11,93	-3,05	23,81	-217,34

**Bild 4-2: Aufzeichnung der Messdaten in „GECOC-C DB“**

Die Software kann dazu genutzt werden, Daten während der Aufnahme zu analysieren oder Messreihen zu markieren, um diese später auszuwerten. Durch die Verwendung von OpenOffice können Datensätze auch in andere Tabellenkalkulationsprogramme, wie bspw. MS-Excel, importiert und verarbeitet werden. Als Schnittstelle zur Datenbank verwendet GECOC-DB Open Database Connectivity (ODBC), welche den Zugriff auf unterschiedliche Datenbank-Verwaltungssysteme wie MSSQL oder PostgreSQL erleichtert. Daher kann das Backend relativ unkompliziert ausgetauscht oder die Software auf bestehende Datenbanksysteme aufgesetzt werden, da die Datenbankabfragen auf standardisierte dynamische „Structured Query Language“ (SQL) aufbauen.

Damit das Datenaufkommen während der Projektlaufzeit nicht zu groß wird, hatten sich die Projektpartner darauf geeinigt, Messwerte in einem Minutenintervall in die Datenbank zu speichern. Im Vergleich dazu speichert bspw. der Aggerverband die Daten bisher in einem drei- bzw. einminütigen Intervall. Da Minutenwerte für eine intensive Analyse der Relaxation und Filtration zu gering sein können, wurde eine weitere Funktion in die Software integriert.

So können Messreihen im Sekundenintervall durchgeführt und bei Bedarf aus dem Datenbanksystem wieder abgerufen werden. Somit wird sichergestellt, dass auch die kleinsten

hydraulischen Effekte während der Filtration, Pause oder Relaxation für Messkampagnen berücksichtigt und somit optimal ausgewertet werden können. Zusätzlich wurde eine weitere Funktion implementiert, bei der die Messreihe in Echtzeit visualisiert wird, damit auch während der Versuchsreihe hydraulische oder biologische Veränderungen verfolgt werden können, um somit eine qualitativ hohe Messwertaufnahme sicher zu stellen.

Durch die entwickelte Infrastruktur ist es möglich – parallel zum bestehenden Prozessleitsystem eines Anlagenbetreibers – Daten aufzunehmen und zu verarbeiten, ohne direkt in den Anlagenprozess einzugreifen. Bei der Entwicklung wurde besonderen Wert auf die Anlagensicherheit gelegt. So können sich bspw. die EnAM-Projektpartner über ein Virtual Private Network (VPN) mit der Software OpenVPN auf den Datenbank-Server einloggen und die Daten ortsunabhängig eigenständig auswerten, ohne den Betrieb der Kläranlage Seelscheid zu gefährden. Dies hat den Vorteil, dass die Projektpartner für eine Versuchsreihe nicht mehr vor Ort anwesend sein müssen, da die Messreihe auch aus der Distanz gestartet und ausgewertet werden kann, ohne das Anlagenpersonal mit zusätzlicher Arbeit zu belasten. Daher kann zusammengefasst werden, dass die Dateninfrastruktur unter Verwendung von

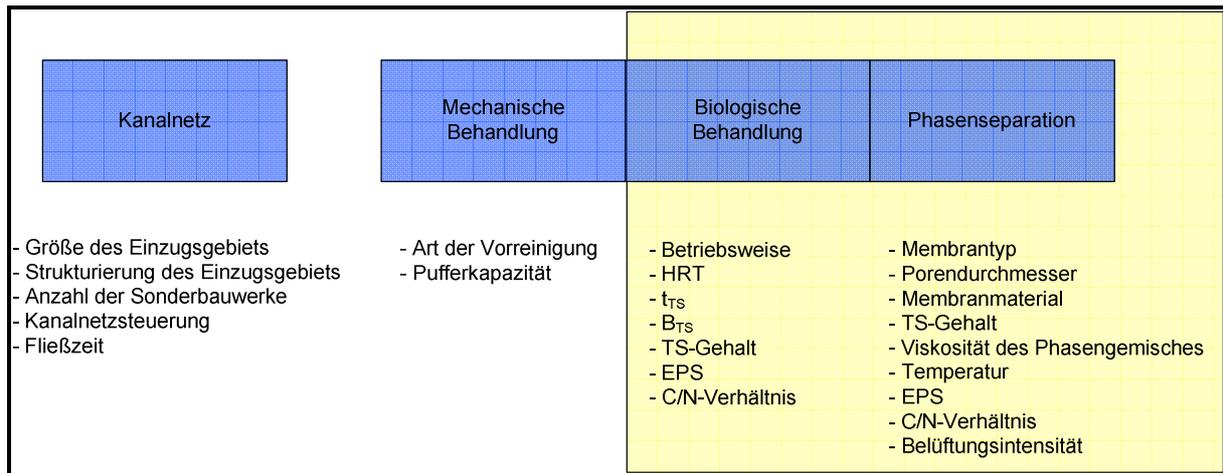
- VPN mit OpenVPN
- OPC Server und Client
- Relationale Datenbank
- Verarbeitungs- und Visualisierungswerkzeug GECOC-DB

über die Projektlaufzeit, parallel zur PDV des Aggerverbandes, zuverlässig funktioniert hat. Auf entsprechende Weise konnte auch die in Seelscheid vorhandene simas-Anlage ohne größere Umbaumaßnahmen in diese Datenverarbeitungsstruktur integriert werden.

## **4.2 Mathematische Grundlagen und Aufbau des Simulationsmodells**

### **4.2.1 Identifizierung der Einflussgrößen**

Abwasser wird i.d.R durch einen stufenweise ablaufenden Prozess gereinigt. Jede Behandlungsstufe (Teilprozess) hat im Interesse einer optimierten Gesamtreinigung (Gesamtprozess) eine spezielle verfahrenstechnische Aufgabe zu erfüllen. Dabei müssen die individuellen Prozesse unter sich verändernden abwassertechnischen Randbedingungen sicher ablaufen. Die maßgeblichen Wirkungsmechanismen bauen auf miteinander verbundenen biologischen, mechanischen und physikalisch-chemischen Prozessen auf.



**Bild 4-3: Darstellung des relevanten Gesamt- bzw. der einzelnen Teilprozesse der Abwasserreinigung und ihre Einflussgrößen**

Neben den weitestgehend bekannten Einflussgrößen aus der konventionellen mechanisch-biologischen Abwasserreinigung existiert bei Membranbelebungsanlagen eine weitere Anzahl beeinflussender Größen, resultierend aus der physikalischen Phasenseparation. Wird ein integraler Betrachtungsraum gewählt, stellen die Struktur des Einzugsgebietes, die Kanalnetzstruktur (Anzahl der Sonderbauwerke), der Fließweg sowie die Kanalnetzsteuerung weitere Einflussgrößen im Bilanzraum dar. Zur Bestimmung der relevanten Einflussgrößen wurden die beiden Teilprozesse der biologischen Behandlung und der Phasenseparation genauer betrachtet.

Im Vergleich zu konventionellen Abwasserreinigungsanlagen erfolgt die Phasenseparation des Schlamm-Wasser-Gemisches in Membranbelebungsanlagen durch Filtration und nicht durch Sedimentation. Die Filtrationsleistung einer Membrananlage hängt sowohl von den membran- und modulspezifischen Eigenschaften, den Betriebsbedingungen als auch von den Eigenschaften des zu filtrierenden Mediums ab. Die Filtrierbarkeit des Schlamm-Wasser-Gemisches wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Für die beiden betrachteten Teilprozesse wurden folgende Einflussgrößen ermittelt:

#### 1 biologische Reinigungsstufe

- Betriebsweise der biologischen Behandlungsstufe
- Schlammalter ( $t_{TS}$ ) bzw. SRT
- Schlammbelastung ( $B_{TS}$ )
- hydraulische Verweilzeit (HRT)
- EPS
- C/N-Verhältnis
- TS-Gehalt

#### 2 Phasenseparation

- Membrantyp (Plattenmembran/Kapillarmembran)
- Porendurchmesser der Membran (MF- oder UF-Membran)
- Membranmaterial
- Permeatfluss bzw. Auslegungsfluss
- EPS
- C/N-Verhältnis
- TS-Gehalt
- Viskosität
- Temperatur
- Belüftungsintensität/Überströmungsgeschwindigkeit

Bei einigen der genannten Einflussgrößen ist eine Einbindung in mathematische Modelle zur quantitativen Beschreibung der Auswirkung nicht möglich. Für diese Größen können i. d. R. nur eingeschränkte qualitative Aussagen gemacht werden. Auch existieren Größen, die sich gegenseitig determinieren. Beispielsweise beeinflussen Temperatur und TS-Gehalt die Viskosität und die Art der Vorreinigung wirkt sich auf die daraus resultierende Schlammbelastung in der biologischen Reinigungsstufe aus.

Die Darstellung der Kenngrößen erfolgt in Anlehnung an die Vorgehensweise des Modell-aufbaus, bei dem zunächst nur die Phasenseparation (Membranstufe) modelltechnisch abgebildet wurde.

### **Prozessgrundlagen für Ultra- und Mikrofiltrationsmembranen**

Der Stofftransport durch die bei der Ultra- und Mikrofiltration eingesetzten Porenmembranen kann durch das idealisierte Porenmodell für Filtrationsanwendungen beschrieben werden. Das Modell beruht auf einer Poiseuille-Strömung, wobei der Fluss durch die Membranporen als Strömung durch Haufwerke mit Hilfe der Carman-Kozeny-Beziehung beschrieben werden kann. Eine laminare Strömung in den zylindrischen Poren vorausgesetzt, errechnet sich die Strömungsgeschwindigkeit und somit der Permeatfluss in den Kapillaren der Membran nach Hagen-Poiseuille. (Gleichung 3) (STEPHENSON et al., 2000; MELIN et al., 2003; MELIN UND RAUTENBACH, 2006).

Zur Berücksichtigung der Deckschichtbildung und weiterer leistungsmindernder Einflüsse kann das Deckschichtmodell von MULDER (1996) herangezogen werden. Dies basiert auf der einfachen Modellvorstellung der Reihenschaltung von Widerständen (Resistance in Series Model), das besagt, dass sich durch den Aufbau einer Deckschicht auf der Membran ein zusätzlicher, in Reihe geschalteter Strömungswiderstand ( $R_{DS}$ ) ergibt. (Fane, 1986; GASPER, 1990; MULDER, 1996, BOERLAGE et al., 1998; MC CARTHY et al., 2002; MELIN et al., 2003; WETT, 2005)

$$v_p = \frac{\Delta p}{\mu \cdot R_{Ges}}$$

$v_p$ : Geschwindigkeit innerhalb der Kapillaren [m/s]

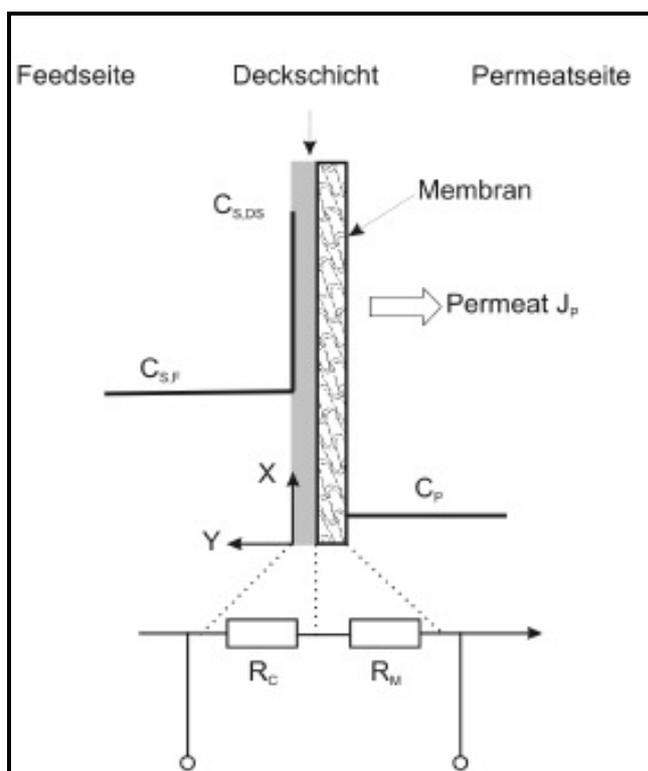
$\Delta p$ : Druckdifferenz [N/m<sup>2</sup>]

$\mu$ : dynamische Viskosität [N·s/(m<sup>2</sup>)]

$R_{Ges}$ : ges. Strömungswiderstand [1/m]

Gleichung 3

Bild 2-1 verdeutlicht die Modellvorstellung des „Resistance in Series Models“. In Anlehnung an diese Modellvorstellung bietet sich die Möglichkeit, das Modell um beliebig viele, in Reihe geschaltete Strömungswiderstände zu erweitern.



**Bild 4-4: Widerstandsmodell zur Formulierung des Deckschichtwiderstandes (Mulder, 1996)**

Somit gilt:

$$R_{Ges} = \sum R_i$$

$R_i$ : strömungswirksame Widerstände

Gleichung 4

Es wurden folgende strömungswirksame Widerstände definiert und modelltechnisch berücksichtigt:

- 1  $R_M$ : Membranwiderstand bei der Reinwasserfiltration (Membrankonstante)
- 2  $R_{DS}$ : Deckschichtwiderstand
- 3  $R_F$ : Foulingwiderstand

Unter Zuhilfenahme des Widerstandsmodells ergibt sich unter Berücksichtigung der Gleichung 1 folgender Zusammenhang:

$$v_p = \frac{\Delta p}{\mu \cdot (R_M + R_{DS} + R_F)}$$

$R_M$ : Membranwiderstand [1/m]

$R_{DS}$ : Deckschichtwiderstand [1/m]

$R_F$ : Foulingwiderstand [1/m]

Gleichung 5

### Membranwiderstand

Der Membranwiderstand  $R_M$  ist der Strömungswiderstand der Membran bei Reinwasserfiltration. Er stellt somit eine Materialkonstante dar und wird in der Regel empirisch ermittelt. Innerhalb des Modells kann dieser auch theoretisch nach STEPHENSON et al. (2000) ermittelt werden.

$$R_M = \frac{\delta \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot A_V^2}{\varepsilon^3}$$

$\delta$ : Membrandicke [m]

$\varepsilon$ : Membranporosität [-]

$A_V$ : volumenspezifische Oberfläche [ $m^2/m^3$ ]

Gleichung 6

### Deckschichtwiderstand

Deckschichtmodelle gehen von dem Zusammenhang zwischen Filtratfluss und den Strömungswiderständen in Deckschicht und Membran aus. Zur Ermittlung des Deckschichtwiderstands kann auf empirische Beziehungen zurückgegriffen werden. Im Rahmen des Vorhabens kommt das erweiterte Deckschichtmodell in vereinfachter Form zur Anwendung. Es geht von der Gleichsetzung der Terme für den konvektiven Hintransport der Feststoffpartikel zur Membran und für den hydrodynamischen Rücktransport in die Kernströmung infolge der Cross-Flow-Belüftung aus. Durch diese Gleichsetzung kann die Deckschichtdicke bestimmt werden. Dies bietet die Möglichkeit, den Deckschichtwiderstand in einen auf die Dicke bezogenen spezifischen Deckschichtwiderstand umzuformen und mit Hilfe der Carman-Kozeny-Beziehung abzuschätzen. (MELIN UND RAUTENBACH, 2006)

### Vereinfachtes Deckschichtmodell

Zur Abbildung des Deckschichtwiderstands wurden drei Betriebszustände für die Filtration definiert:

#### 1 Zustand I:

Relaxieren  $t_0 \leq t < t_1$  (Cross-Flow-Belüftung und keine Filtration)

Berücksichtigung der Belüftungsintensität

#### 2 Zustand II:

Filtration  $t_1 \leq t < t_2$  (Cross-Flow-Belüftung und Filtration)

Berücksichtigung der deckschichtwirksamen Feststoffmasse

Einflussgrößen: filtrierter Volumenstrom und Feststoffkonzentration, Blasengröße, CF-Volumenstrom

### 3 Zustand III:

Pause  $t_2 \leq t < t_3$  (keine Cross-Flow-Belüftung und keine Filtration)

Berücksichtigung der Relaxionszeit

Der Deckschichtwiderstand  $R_{DS}$  wird im vereinfachten Filtrationsmodell zum Deckschichtaufbau wie folgt berücksichtigt:

$$R_{DS}(t) = r_{DS} \cdot m_p(t) = r_{DS} \int_0^t F(\tau) \cdot X_{TSS}(\tau) - k_r \cdot Q_{CF}(\tau) \cdot X_{TSS}(\tau) - k_p(\tau) d\tau \quad \text{Gleichung 7}$$

$$Q_{CF}(t) := \begin{cases} Q_{CF} & \text{relaxieren: } t_0 \leq t < t_1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad k_p(t) := \begin{cases} k_p & \text{Pause: } t_2 \leq t < t_3 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad k_r > 0; k_p \geq 0$$

$m_p(t)$ : deckschichtwirksame Masse an Feststoffen innerhalb eines Filtrationsintervalls [kg]	$F(\tau)$ : filtrierter Volumenstrom innerhalb des Filtrationsintervalls [ $m^3$ ]
$r_{DS}$ : spez. Deckschichtwiderstand [ $1/(kg \cdot m)$ ]	$X_{TSS}$ : Feststoffkonzentration der Suspension [ $kg/m^3$ ]
$k_r$ : Relaxionskonstante [-]	$Q_{CF}$ : Volumenstrom der Cross-Flow-Belüftung [ $m^3/h$ ]
$k_p$ : Pausenkonstante [-]	

Die sensitivste Einflussgröße auf die Deckschichtbildung und somit auf den Deckschichtwiderstand ist  $X_{TSS}$ . Die Feststoffkonzentration geht sowohl in den Deckschichtaufbau (Filtrationsphase) als auch in den Deckschichtabbau (Relaxionsphase) mit ein. Die beiden Konstanten  $k_r$  und  $k_p$  werden empirisch anhand von Prozessdaten bestimmt. Demnach erfolgt die Berechnung des Deckschichtwiderstands gemäß Gleichung 8.

$$R_{DS}(t) = r_{DS} \cdot 24 \cdot 10^{-3} \int_0^t F(\tau) \cdot \frac{\eta(T(\tau))}{\eta_{20^\circ C}} \cdot X_{TSS}(\tau) + k_{CF} \cdot F(\tau) \cdot e^{-c_{CF} \cdot Q_{CF}(\tau)} - k_r \cdot Q_{CF}(\tau) - k_{r,SI} \cdot Q_{CF,SI}(\tau) - k_p(\tau) d\tau \quad \text{Gleichung 8}$$

#### Foulingwiderstand

Die modelltechnische Abbildung des Foulingwiderstands nach WINTGENS (2005): Dieser berücksichtigt das reversible Fouling ähnlich einer Adsorptionskinetik durch eine Exponentialfunktion. Wie auch bei CHO et al. (2002) beruht die Modellierung des Foulingwiderstands auf der Annahme der Permeabilitätsminderungen durch die Einbringung und Anlagerung feinsten Partikel in die Porenstruktur. Diese Partikeleinbringung bzw. -anlagerung kann in Anlehnung der Adsorptionskinetik 1. Ordnung beschrieben werden. (WINTGENS, 2005)

$$R_F = S_F \cdot \left( 1 - e^{-k_f \cdot \frac{24}{1000} \int_0^t F(\tau) d\tau} \right) \quad \text{Gleichung 9}$$

$S_F$ : Fouling-Konstante [ $1/m$ ]  $k_f$ : Zeitkonstante Verblockung [ $m^2/(m^3 \cdot s)$ ]  $F$ : flächenspezifischer Permeatfluss [ $m^3/(m^2 \cdot s)$ ]

Der hier definierte Koeffizient  $k_f$  ist eine Funktion der Konzentration permeabilitätsmindernder Substanzen und deren Affinität zur Membran. Der Faktor  $S_F$  stellt eine Membrankonstante

dar, die ein Maß für die im Membranmaterial durch Foulingprodukte maximal zu belegende innere Oberfläche und damit die erreichbare Widerstandssteigerung ist. Eine Berücksichtigung der chemischen Reinigung der Membran kann ebenfalls erfolgen.

In der Simulation wird das Intervall  $[0, t]$  in zwei Abschnitte unterteilt:

1. Zeitraum: ab dem 1. Betriebstag der Anlage bis zum Startpunkt der Simulation  $[0, t_{sa}]$
2. Zeitraum: Simulationszeitraum  $[t_{sa}, t_{se}]$

Das ergibt dann gemäß Gleichung 9 folgenden Ausdruck:

$$R_F = S_F \cdot \left( 1 - e^{-k_f \cdot \frac{24}{1000} \int_0^t F(\tau) d\tau} \right) \quad \text{Gleichung 10}$$

Da für den ersten Zeitraum  $[0, t_{sa}]$  i.d.R. keine kontinuierlichen Messungen für den Permeatfluss vorliegen, wird für diesen Zeitraum  $[0, t_{sa}]$  ein mittlerer Flux (Bemessungsflux) angesetzt. Die chemische Reinigung, die eine Reduzierung des Foulingwiderstands bewirkt, wird wie folgt berücksichtigt (Gleichung 11).

$$R_F = S_F \cdot \left( 1 - e^{-k_f \cdot \frac{24}{1000} \cdot (1 - \phi_c) \cdot \int_0^{t_{CR}} F(\tau) d\tau} \right) \quad \text{Gleichung 10}$$

$t_{CR}$  = Zeitpunkt der chemischen Reinigung     $\phi_c$  = mittlerer Effizienzgrad der chemischen Reinigung

Die zusammengestellten Einflussgrößen des Teilprozesses Phasenseparation werden modelltechnisch direkt oder indirekt berücksichtigt (Tabelle 4-1). Die direkten Modellgrößen beziehen sich ausschließlich auf eine Einflussgröße und gehen unverändert in die Modellberechnungen ein. Die Temperatur und der TS-Gehalt stellen dabei Einflussgrößen dar, die vom Modell der biologischen Reinigungsstufe übernommen werden. Die Temperatur kann als konstante oder variable Größe berücksichtigt werden. Je nach Berücksichtigung der Temperatur bedingt sich die Einbindung der Viskosität in den Modellbaustein für die Filtrationsstufe. Der Permeatfluss bzw. Transmembrandruck als die leistungscharakterisierenden Größen des Phasenseparationsprozesses sind die vorherzusagenden Modellgrößen.

**Tabelle 4-1: Modelltechnische Berücksichtigung der identifizierten Einflussgrößen**

<b>Einflussgröße</b>	<b>indirekte Modellgröße</b>	<b>direkte Modellgröße</b>
Membrantyp	$R_M$ $S_F$ $k_p$	
Trenngrenze (MF oder UF)	$R_M$ $S_F$	
Membranmaterial	$R_M$ $S_F$	
<b>Permeatfluss/<math>\Delta p</math></b>		<b><math>L_p(t), F(t), TMP(t)</math></b>
EPS	$r_{DS}$ $k_f$	
C/N-Verhältnis	$r_{DS}$	
TR-Gehalt		$X_{TSS}$
Temperatur		T
Viskosität		$\mu$
Belüftungsintensität/ Überströmungsgeschwindigkeit	$r_{DS}$ $k_f$	

Im Zuge der mathematischen Beschreibung des Filtrationsprozesses müssen neben den filtrationsspezifischen Einzelwiderständen weitere physikalische Einflussgrößen berücksichtigt werden. Neben der Viskositätsberechnung (Gleichung 12) muss bei nass aufgestellten Filtrationssystemen auch noch der hydrostatische Druck (Gleichung 13) berücksichtigt werden.

$$\eta(T(t)) = \eta_{20^\circ C} \cdot e^{(-0,0239 \cdot T(t) - 20^\circ C)} \quad \text{Gleichung 12}$$

$$p(t) = \Delta p_{TM}(t) + c_{H_2O} \cdot \left( \frac{h_{H_2O}(t)}{100} \cdot h_{Becken} - h_{Sensor} \right) \cdot 100 \quad \text{Gleichung 13}$$

#### 4.2.2 Modellumgebung

Das allgemeine Simulationsmodell für Membranstufen von Membrankläranlagen wurde mit der Software MATLAB von MathWorks (MATHWORKS, 2011) entwickelt. MATLAB ist eine interaktive Umgebung zur Entwicklung numerischer Programme und besitzt zahlreiche Werkzeuge (Toolbox), mit denen verschiedenste numerische Aufgaben aus den unterschiedlichsten Fachbereichen gelöst werden können. Dazu gehören:

- Modellierung und Simulation von Simulationsmodellen beliebiger Prozesse
- Durchführung von Optimierungsrechnungen
- Grafische und statistische Auswertung von Ergebnissen
- Entwicklung von Programmen mit optionalen grafischen Benutzeroberflächen

MATLAB bietet sich als ideale Entwicklungsumgebung zur Modellierung und Simulation des Membranstufenmodells an, da zusätzlich auch eine Optimierung der Modellparameter durchgeführt und alle Ergebnisse statistisch wie auch visuell ausgewertet werden können. Zum Entwurf eines Simulationsmodells wird die Toolbox Simulink verwendet, welche es ermöglicht, mathematische Gleichungen visuell durch Blöcke miteinander zu verbinden, wodurch hochdynamische Systeme mit vielen Gleichungen übersichtlich und transparent beschrieben werden können.

Um die Vorteile von Simulink während der Entwicklung des allgemeinen Simulationsmodells für Membranstufen zu verwenden, wurde Matlab in Verbindung mit dieser Toolbox eingesetzt. Aufbauend auf diesem Modell wurde zusätzlich ein detailliertes Simulationsmodell der Membrankläranlage Seelscheid und der simas-Anlage in Simulink entwickelt. Des Weiteren wurden die biologischen Abbauprozesse der Membrankläranlage Seelscheid auf Grundlage des ASM1-Ansatzes modelliert und simuliert.

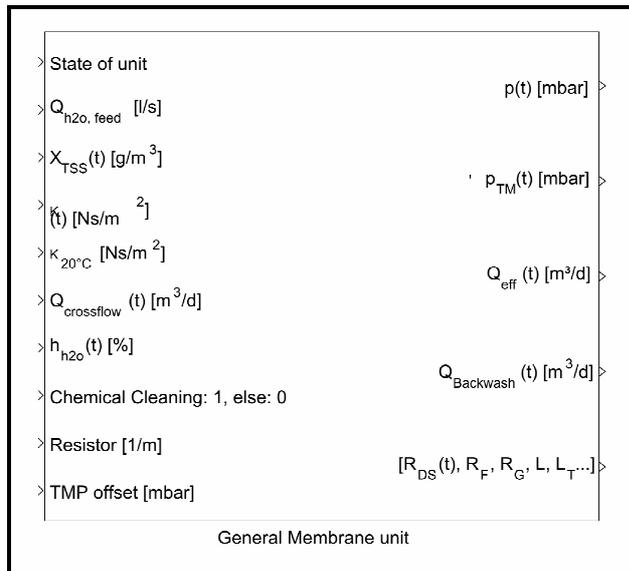
### 4.3 Modellentwicklung

Auf Basis der diskutierten Modellgleichungen wurde in Simulink ein Simulationsmodell entwickelt, welches auf dem idealisierten Porenmodell für Filtrationsanwendungen gemäß der Poiseuille-Strömung basiert. Hierbei wird der Fluss durch die Membranporen als Strömung durch Haufwerke mit Hilfe der Carman-Kozeny Beziehung beschrieben, wodurch sich die Strömungsgeschwindigkeit und somit der Permeatfluss in den Kapillaren der Membran bestimmen lässt. (STEPHENSON et al., 2000; MELIN et al., 2003; MELIN UND RAUTENBACH, 2006). Das mathematische Modell berücksichtigt den Intrinsischen Widerstand (Membranwiderstand), den Deckschichtwiderstand und den Foulingwiderstand. Spezielle lokale Membrananlageneffekte können mit einem zusätzlichen Anlagenwiderstand erweitert bzw. abgebildet werden.

Neben den oben erwähnten Widerständen erfolgt zudem die Berechnung des Ruhedrucks, die Berechnung der dynamischen Viskosität aus der Temperatur sowie die Definition der Permeabilität. Auf Grundlage der im Kapitel 4.2.1 aufgeführten Gleichungen werden folgende Eingangsdaten benötigt, um den Druckverlauf sowie den Transmembrandruck zu berechnen:

- Trockensubstanz
- Sollwert Permeatflux
- Wassertemperatur
- Füllstand in den Membranstraßen
- Crossflow-Belüftung
- Chemisches Reinigungsprotokoll

In Bild 4-5 wird das allgemeine Simulationsmodell in einem Simulinkblock dargestellt, wobei links die Eingänge und rechts die Ausgänge abgebildet sind.



**Bild 4-5: Allgemein Simulationsmodell der Membranstufe**

In Tabelle 4-2 werden die Eingangsdaten des allgemeinen Simulationsmodells in Simulink aufgelistet, welche zur Berechnung des Transmembrandrucks benötigt werden.

**Tabelle 4-2: Eingangsdaten des allgemeinen Simulationsmodells in Simulink**

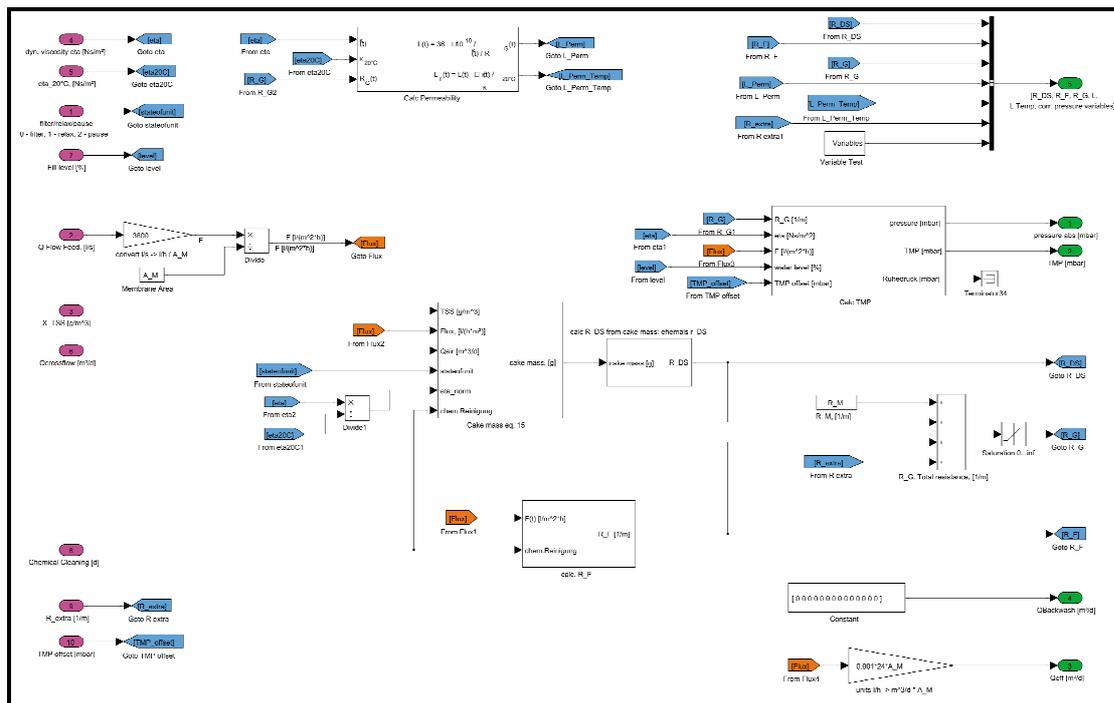
Nr.	Beschriftung	Beschreibung	Einheit
1	state of unit	Die drei Betriebszustände der Membranstufe werden durch die Zahlen 0 (Filtration), 1 (Relaxation) und 2 (Pause) symbolisiert.	-
2	Qh2o,feed [l/s]	Sollwert Filtrationsmenge	l/s
3	XTSS(t) [g/m³]	Trockensubstanz	g/m³
4	$\eta(t)$ [Ns/m²]	Dynamische Viskosität	Ns/m²
5	$\eta_{20^\circ\text{C}}$ [Ns/m²]	Konstante, welche in der Berechnung der dynamischen Viskosität genutzt wird und der dynamischen Viskosität von Wasser bei einer Temperatur von 20 °C entspricht.	Ns/m²
6	Qcrossflow(t) [m³/d]	Luftvolumenstrom der Crossflowbelüftung	m³/d
7	hh2o(t) [%]	Füllstand der Membranstraße	%
8	Chemical Cleaning: 1, else: 0	Eine chemische Reinigung wird über diesen Eingang solange durchgeführt wie eine 1 anliegt.	-
9	Resistor [1/m]	Dieser Eingang kann dazu genutzt werden, weitere Widerstände in die Summe über die Membranwiderstände hinzufügen. Der hier angeschlossene Widerstand wird den anderen Widerständen additiv hinzugefügt.	1/m
10	TMP offset [mbar]	Dieses Signal wird additiv der TMP Berechnung aus dem Modell überlagert.	mbar

Die Ausgangsdaten des Simulationsmodells werden in Tabelle 4-3 anschaulich dargestellt und erklärt. Wie beschrieben werden die einzelnen Gleichungen in Simulink blockweise

zusammengefügt. Wird der oben beschriebene „allgemeine Modellblock“ geöffnet, werden alle Modellgleichungen, wie in Bild 4-6 illustriert, dargestellt.

**Tabelle 4-3: Ausgangsdaten des allgemeinen Simulationsmodells in Simulink**

Nr.	Beschriftung	Beschreibung	Einheit
1	$p(t)$ [mbar]	Der durch das Modell berechnete Saugdruck	mbar
2	$\Delta p_{TM}(t)$ [mbar]	Der durch das Modell berechnete Transmembrandruck	mbar
3	$Q_{eff}(t)$ [m <sup>3</sup> /d]	Die filtrierte Wassermenge	m <sup>3</sup> /d
4	$Q_{Backwash}(t)$ [m <sup>3</sup> /d]	Die Wassermenge eines potenziellen Backwash-Betriebs wird hier zurückgegeben	m <sup>3</sup> /d
5	$R_{DS}(t), \dots$	Interne Variablen wie bspw. der Deckschichtwiderstand	



**Bild 4-6: Allgemeines Simulationsmodell der Membranstufe im Detail**

Falls eine Membrananlage mehrere Straßen bzw. Einheiten hat, kann der allgemeine Modellblock einfach kopiert werden, ohne jedes Mal die Gleichungen neu einfügen zu müssen. Dadurch können relativ schnell neue Simulationsmodelle von verschiedenen Membrankläranlagen aufgebaut werden. Um die Flexibilität dieses Modellansatzes vorzustellen wird im Folgenden das Simulationsmodell der KA Seelscheid diskutiert.

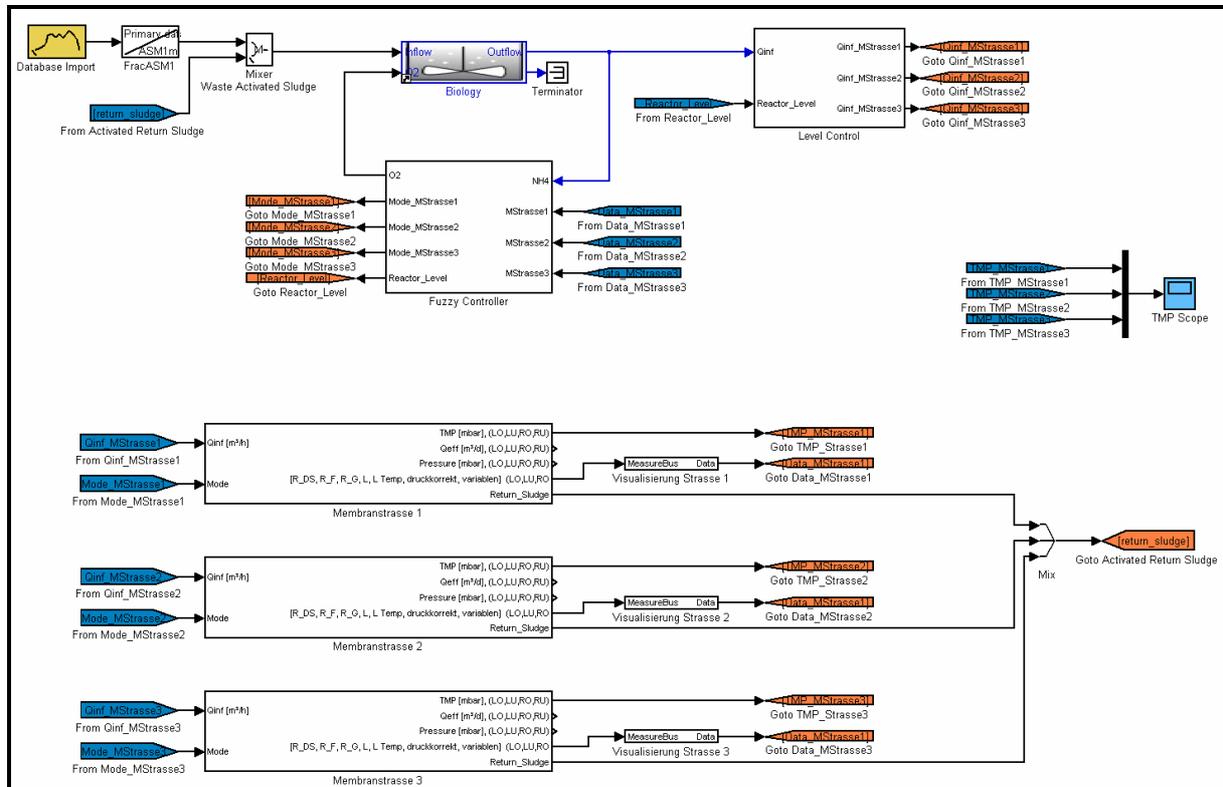
### Erweitertes Simulationsmodell der Membranstufe Seelscheid

Für die Membrankläranlage Seelscheid wurde das allgemeine Modell der Membranstufe erweitert, so dass das neue Modell die Gegebenheiten auf der Membrankläranlage Seelscheid noch besser beschreiben kann. Hierbei zeigen sich die Vorteile des Modells, da es problemlos durch weitere Effekte in Form von Membranwiderständen erweitert werden kann.

In Seelscheid wurde beobachtet, dass sich die Membranstufen bei Vollastbetrieb anders verhalten als bei Teillastbetrieb. Das hängt damit zusammen, dass bei starker Beanspruchung einer Membranstraße alle vier Untereinheiten gleichzeitig filtern und sich damit unterschiedliche Druckverhältnisse zwischen Druckmessstelle und Membran ergeben. Dieses Verhalten konnte mit Hilfe des Modells, unter Berücksichtigung eines weiteren Widerstands, nachgebildet werden. Dieser neue Widerstand ist nur dann aktiv, wenn alle vier Untereinheiten einer Straße gleichzeitig filtern. Zusätzlich ergibt sich eine Ruhedruckverschiebung, so dass über den letzten Eingang des allgemeinen Modells „TMP offset [mbar]“ ein Offset auf den berechneten Transmembrandruck gegeben wird. Durch die Nutzung des erweiterten Modells konnte die Qualität der Simulationsergebnisse im Vergleich zum allgemeinen Modell für die Kläranlage Seelscheid deutlich verbessert werden.

#### 4.3.1 Das Simulationsmodell am Beispiel der KA Seelscheid

Das komplette Simulationsmodell der Membrankläranlage Seelscheid ist in Bild 4-7 abgebildet. Die Messdaten werden aus einer Datenbank gelesen und speziell zur Zulauffraktionierung (ASM 1) weitergeleitet. Grundsätzlich beschreiben alle ASM Modellansätze die biologischen Abbauvorgänge in Kläranlagen, wobei der am meisten eingesetzte und weniger komplexe Modellansatz ASM 1 die CSB-Elimination sowie die Stickstoffelimination (Nitrifikation und Denitrifikation) beschreibt.

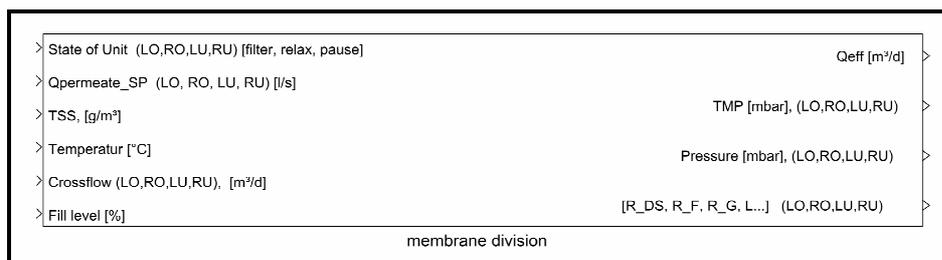


**Bild 4-7: Aufbau des Simulationsmodells der Membrankläranlage Seelscheid (Biologie und Membranstraßen)**

Ziel des Modells ist es, in Abhängigkeit der Zulaufbedingungen Vorhersagen darüber zu treffen, wie sich bei gegebener Verfahrensvariante der Zustand des Systems und des gereinigten Abwassers verändert. Sobald die Biologie für jede Straße simuliert wurde, kommt das „Widerstand in Reihe“-Modell zum Einsatz. Durch dieses Simulationsmodell konnte die Kompatibilität zum ASM 1 bewiesen werden. Auf die Teilprozesse Biologie und Membranstufe wird in den folgenden beiden Unterabschnitten näher eingegangen.

## Modellierung der Membranstraßen

Jede der drei Membranstraßen wurde durch je vier getrennt, ansteuerbare Einheiten des erweiterten Modells der Membranstufe modelliert, um jede Straße möglichst genau abzubilden. In Bild 4-8 ist solch ein „Straßenblock“ abgebildet. Wie zu erkennen ist, müssen die Eingangsgrößen, bspw. der Zustand jeder einzelnen Einheit, für jede Einheit einzeln übergeben werden (LO, RO, LU, RU). Dabei steht L für links, R für rechts, O für oben und U für unten.



**Bild 4-8: Modell einer Membranstraße**

In diesem Block sind vier der vorher aufgeführten Membraneinheiten enthalten und miteinander verknüpft. Somit kann jede einzelne „Einheit“ unabhängig voneinander simuliert werden, um das Verhalten der KA Seelscheid abzubilden.

## Modellierung der Biologie

In Bild 4-9 wird das Modell der Biologie der Membrankläranlage Seelscheid abgebildet. Nach der Nitrifikation wird der Block SC-ideal modelliert, welcher ein ideales Nachklärbecken ist, in dessen Ablauf keine partikulären Bestandteile enthalten sind und keine Speicherung von Schlamm modelliert wird. Dieser Block wird ausschließlich dazu verwendet, den Rücklaufschlamm zu simulieren.

Im Block „Qeff & Biology“ wird der ASM 1 Vektor aufgetrennt und mit dem Volumenstrom des idealen Nachklärbeckens kombiniert. Am Ausgang dieses Modells wird der Zustand des Systems an die Membranstraße weitergegeben. Im unteren Teil des Bilds sind die beiden Regler für das Gebläse sowie für die Regelung des Rücklaufschlammes zu sehen

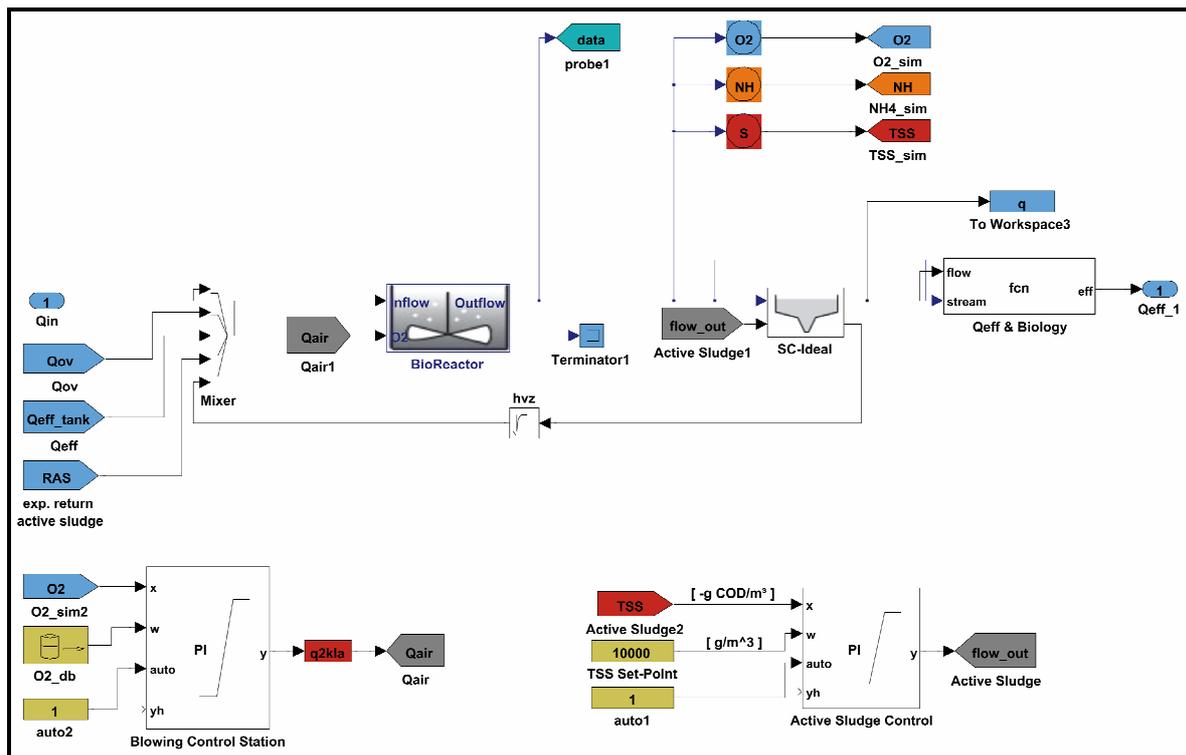
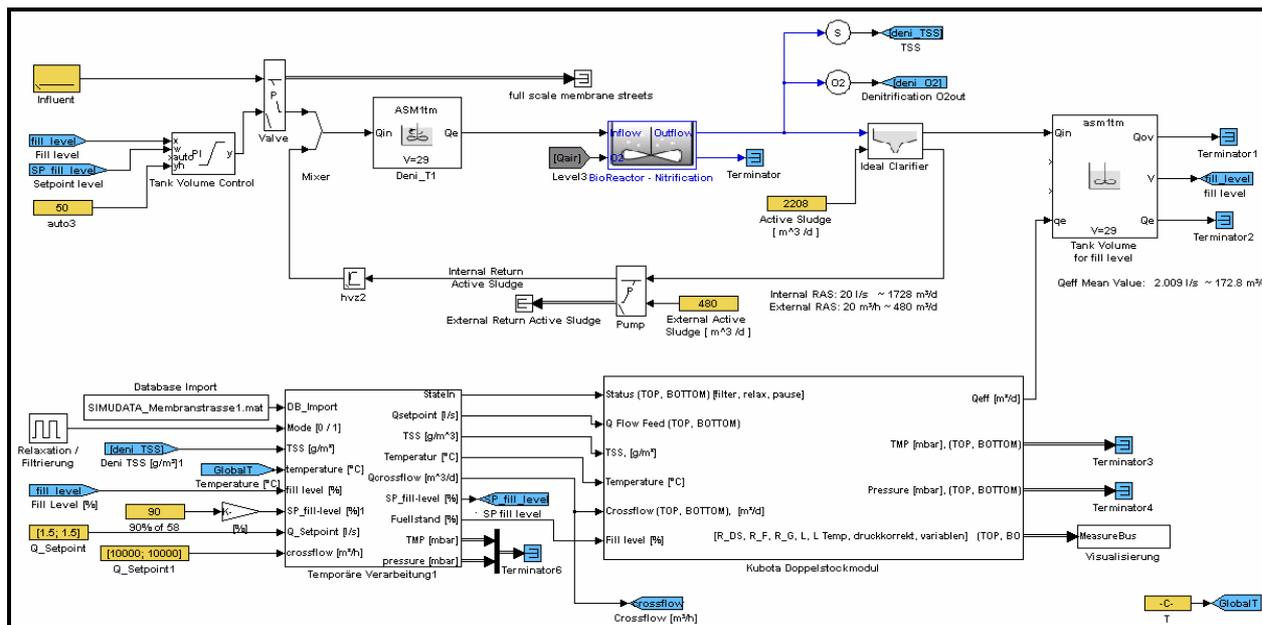


Bild 4-9: Modellierung der Biologie der KA Seelscheid

### 4.3.2 Simulationsmodell am Beispiel der simas-Anlage

Aufbauend auf dem Modell der KA Seelscheid wurde zur Prozessoptimierung ein Simulationsmodell der simas-Anlage entwickelt. Dieses Modell sollte zur Prozessoptimierung in Echtzeit verwendet werden. Bild 4-10 zeigt den gesamten Aufbau des Modells, welche sowohl die Biologie als auch die Membranstufe enthält.



**Bild 4-10: Simulationsmodell der simas-Anlage**

Im oberen Abschnitt wird die Biologie modelliert und im unteren Abschnitt ist das Modell der Membranstraße abgebildet. Im Teil der Biologie modelliert der Block „Deni\_T1“ die Denitrifikation der linken Kammer und der Block „BioReactor - Nitrification“ die Nitrifikation in der rechten Kammer. Der Simulationsblock „Tank Volume for fill level“ bildet den Füllstand des Membranreaktors ab. Die Steuerung des Zulaufs der simas-Anlage erfolgt über einen PI-Regler. Die mit einem Doppelstockmodul der Firma Kubota ausgeführte Membranfiltration wird modelltechnisch durch zwei Membraneinheiten berücksichtigt. Somit können die obere und die untere Membraneinheit des Doppelstockmoduls unabhängig voneinander simuliert werden.

### 4.3.3 Kalibrierung und Validierung der Modellparameter

Damit das allgemeine Modell der Membranstufe verschiedene Membrankläranlagen realitätsnah modellieren kann, müssen die offenen Modellparameter an Hand von Messdaten der entsprechenden Anlage richtig eingestellt werden. Dieser Prozess wird im Allgemeinen als Kalibrierung bezeichnet. Offene Modellparameter sind bspw.  $r_{DS}$ ,  $k_r$ ,  $k_p$ . Die Einstellung dieser Modellparameter erfolgte über einen Vergleich des gemessenen und simulierten Saugdrucks. Dabei werden die Modellparameter als optimal eingestellt bezeichnet, wenn der Unterschied zwischen den beiden Messgrößen minimal ist. Dieses Problem kann als Optimierungsproblem formuliert werden, welches lautet: „Minimiere den quadratischen Fehler zwischen gemessenen und simulierten Saugdrücken durch Veränderung der Modellparameter“ (LUDWIG et. al., 2010).

Um zu testen, ob das kalibrierte Modell die Zusammenhänge des Systems Membranstufe realistisch wiedergeben kann, wird das Modell an Hand von neuen Messdaten validiert. D.h. es wird eine Simulation mit den durch die Kalibrierung bestimmten optimalen Modellparametern für einen neuen Zeitraum  $[0, t]$  durchgeführt und die simulierten Saugdrücke mit den zu diskreten Zeitpunkten  $0 \leq \tau_i \leq t, i=1, \dots, N$ , gemessenen Drücken verglichen. Da während der Kalibrierung der quadratische Fehler  $v$  mit

$$v = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (p(\tau_i) - \hat{p}(\tau_i))^2} \quad (\text{Gl.8})$$

zwischen den beiden Größen minimiert wird, bietet es sich bei der Validierung ebenfalls an über dieses Fehlermaß die Güte des Modells zu bestimmen.

Zum Vergleich der Anlagen untereinander ist allerdings ein Fehlermaß, welches die Güte in Prozent misst, repräsentativer. Deshalb wurden alle Anlagen über das Performancemaß Modellqualität bewertet, welches den quadratischen Fehler auf eine robuste Schätzung des Wertebereiches der simulierten Drücke bezieht:

$$v_{\%} = 100 - \frac{v}{q_{.9999}(\hat{\mathbf{p}}) - q_{.0001}(\hat{\mathbf{p}})} \quad (\text{Gl.9})$$

Da die gemessenen, und damit auch die simulierten Daten, fehlerbehaftet sein können, d.h. Ausreißer beinhalten können, wird geschätzt, dass der Wertebereich für die simulierten Drücke nicht einfach aus der Differenz des maximalen und minimalen Wertes bestimmt werden kann. Der Grund hierfür ist, dass der minimale oder maximale Wert jeweils ein Ausreißer sein könnte und damit der realistische Wertebereich falsch bestimmt werden würde. Die Schätzung über die Quantile  $q$  verhindert dieses. Die Quantile  $q_{.9999}(\hat{\mathbf{p}})$  ist das  $0.9999 \cdot N$ -te Element des sortierten Vektors  $\hat{\mathbf{p}} = (\hat{p}(\tau_1), \dots, \hat{p}(\tau_i), \dots, \hat{p}(\tau_N))^T$  vom kleinsten zum größten Wert. Falls  $0.9999 \cdot N$  keine ganze Zahl ist, dann wird die nächstgrößere ganze Zahl genommen.

#### 4.4 Modellkalibrierung und -validierung

Grundsätzlich ist das Simulationsmodell so ausgelegt, dass es verschiedene Membrankläranlagen abbilden kann. Um gute Ergebnisse zu erreichen, muss es jedoch an jede Anlage individuell angepasst werden. Dies geschieht anhand einer Kalibrierung mit echten Messwerten der Anlage. Hierbei wird mit einer Optimierungsmethode gearbeitet, die Fehler zwischen den gemessenen und den simulierten Größen minimiert, indem sie die verschiedenen Modellparameter optimal einstellt. Anschließend erfolgt die Validierung mit dem Ziel festzustellen, ob das durch die Kalibrierung parametrisierte Modell auch für neue, unbekannte Messdaten gute Ergebnisse liefert. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Membrankläranlage Seelscheid, der simas-Anlage, der KA Nordkanal, der KA Konzen sowie der KA Monheim vorgestellt.

#### 4.4.1 Plattenmembran

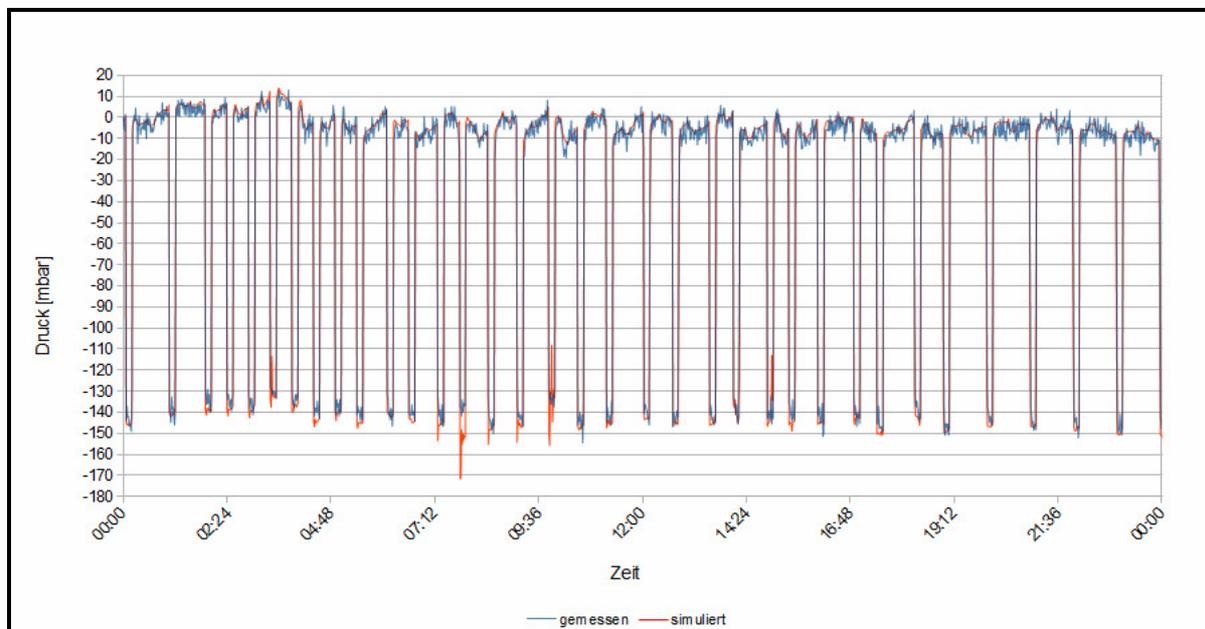
##### KA Seelscheid

Die KA Seelscheid ist die Referenzanlage für das Simulationsmodell und wurde unter anderem vom 05.03.2009 bis 08.04.2009 kalibriert und vom 11.04.2009 bis 28.04.2009 validiert. Die Ergebnisse dieser Kalibrierung und Validierung sind in Tabelle 4-4 aufgeführt.

**Tabelle 4-4: Ergebnisse der Kalibrierung und Validierung der KA Seelscheid**

	Kalibrierung		Validierung		Kalibrierung	Validierung
	Oben	Unten	Oben	Unten	Oben und unten	Oben und unten
<b>Straße 1</b>	95,6	95,2	91,9	89,4	95,4	90,7
<b>Straße 2</b>	95,5	95,7	90,7	90,6	95,6	90,6
<b>Straße 3</b>	94,7	95,9	90,1	91,5	95,3	90,8
<b>Mittelwert:</b>					95,4 ( $\pm 0,2$ )	90,7 ( $\pm 0,1$ )

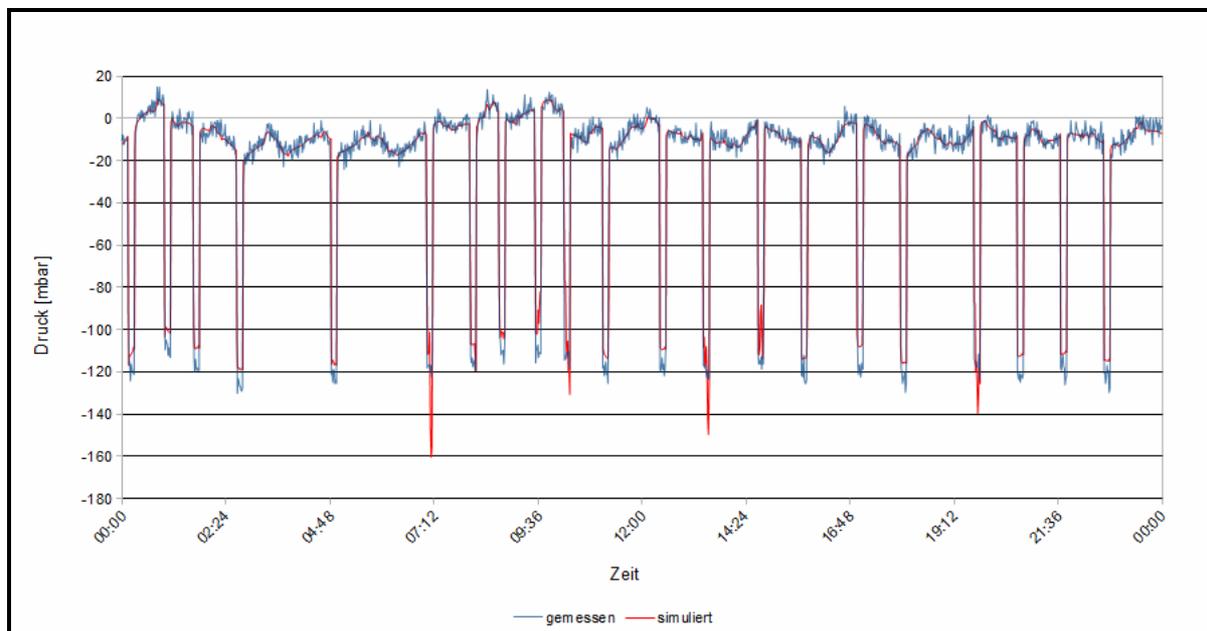
Wie zu sehen ist, konnte das Simulationsmodell die KA Seelscheid gut nachbilden. Die drei Straßen haben ein ähnlich gutes Kalibrierungs- und Validierungsergebnis erzielt, welches sich in der Modellqualität nur geringfügig unterscheidet. Bild 4-11 zeigt das Ergebnis der Kalibrierung am 02.04.2010. Es wird deutlich, dass die Straße 1 des Elements oben-links gut nachgebildet wird. Bis auf wenige Peaks, welche auf eine hydraulische Belastung zurückzuführen sind, wird der gemessene Wert gut vom simulierten Messwert nachgebildet.



**Bild 4-11: Kalibrierung der Straße 1, Element oben links am 02.04.2010**

Dieser hydraulische Lastwechsel entsteht, wenn sich der Filtrations- und Relaxationsintervall dynamisch ändert. Dies kann in Bild 4-12 anhand der Validierung vom 26.04.2010 von

Straße 3, Element rechts oben, veranschaulicht werden. Ein hydraulischer Lastwechsel beginnt um 07:12 mit dem Wechsel des Filtrations- und Relaxationszyklus. Die Filtrationspause wird kleiner und der Permeat-Flux steigt an.



**Bild 4-12: Validierung Straße 3, Element rechts oben am 26.04.2010**

Trotz dieser kleinen Abweichungen des Simulationsmodells zu den Messwerten, konnte der Prozess der Membranfiltration erfolgreich mit einem Modellqualitätsmittelwert von 91% validiert werden. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Anlage erfolgreich kalibriert und validiert wurde und somit gut nachgebildet werden konnte.

### simas-Anlage

Die simas-Anlage wurde zu Optimierungszwecken für das Simulationsmodell verwendet. Auf diesem Weg konnten ungewöhnliche Betriebseinstellungen getestet werden. Die hierbei erzielten Ergebnisse sind in das Simulationsmodell eingeflossen und sollten den Parameter-raum sowie die Vielseitigkeit des Modells erweitern. Während dieses Testzeitraums wurde die Anlage vom 01.01.2010 bis 12.04.2010 kalibriert und vom 13.04.2010 bis zum 01.06.2010 validiert. Anhand dieser Kalibrierung und Validierung sollte eine Langzeitkalibrierung und -validierung mit stark unterschiedlichem Betriebsverhalten simuliert werden.

**Tabelle 4-5: Kalibrierungs- und Validierungsergebnisse der simas-Anlage**

	Kalibrierung		Validierung		Kalibrierung	Validierung
	Oben	Unten	Oben	Unten	Oben und unten	Oben und unten
<b>Straße 1</b>	84,0	91,1	70,9	87,7	87,6	79,3

Wie in Tabelle 4-5 dargestellt, variieren die Ergebnisse durch die verschiedenen Betriebseinstellungen – wie erwartet – sehr stark, liegen aber mit einem Modellqualitäts-ergebnis während der Validierung von 79,3% noch im zufriedenstellenden Bereich. Anhand dieser Ergebnisse kann zusammengefasst werden, dass das Modell auch hoch-dynamische Effekte bei extrem variablem Betriebsverhalten über einen längeren Kalibrierungszeitraum gut nachbilden kann.

### KA Konzen

Die KA Konzen wurde vom 01.03.2010 bis 30.03.2010 kalibriert und vom 31.03.2010 bis 13.04.2010 validiert. Wie in Tabelle 4-6 dargestellt, konnte die Anlage mit guten Ergebnissen kalibriert und validiert werden. Die hohe Standardabweichung der Validierung wird durch Straße 5 verursacht, welche ein eher mittelmäßiges Ergebnis aufweist. Bei genauer Betrachtung der Messdaten vom 31.03.2010 bis zum 13.04.2010 konnte dieses Validierungsergebnis auf Wartungsarbeiten während dieses Zeitraums zurückgeführt werden.

**Tabelle 4-6: Ergebnisse der Kalibrierung und Validierung der KA Konzen**

	Kalibrierung		Validierung		Kalibrierung	Validierung
	Oben	Unten	Oben	Unten	Oben und unten	Oben und unten
<b>Straße 1</b>	95,1	94,0	93,9	92,7	94,5	93,3
<b>Straße 2</b>	95,3	94,6	94,9	93,4	95,0	94,2
<b>Straße 3</b>	94,3	91,4	93,9	87,1	92,8	90,5
<b>Straße 4</b>	93,9	92,1	93,4	92,0	93,0	92,7
<b>Straße 5</b>	94,4	93,2	82,2	55,5	93,8	68,9
<b>Straße 6</b>	94,2	92,9	94,8	93,1	93,6	94,0
<b>Straße 7</b>	94,1	93,6	93,0	92,5	93,8	92,7
<b>Straße 8</b>	85,5	80,3	87,8	78,8	82,9	83,3
<b>Mittelwert:</b>					92,4 (±3,9)	88,7 (±8,8)

Hierbei wurde deutlich, dass das Simulationsmodell auch über vielfältige Einsatzmöglichkeiten verfügt. So können ungewöhnliche Anlagenzustände automatisch erkannt werden, wodurch frühzeitig auf Anlagenprobleme reagiert werden kann. Abschließend kann zur Kalibrierung und Validierung der KA Konzen gesagt werden, dass das Simulationsmodell die dynamischen Effekte und Eigenschaften der Anlage gut abbildet, wodurch weitere Optimierungsmaßnahmen durchgeführt werden können.

### 4.4.2 Hohlfasermembran

#### KA Nordkanal

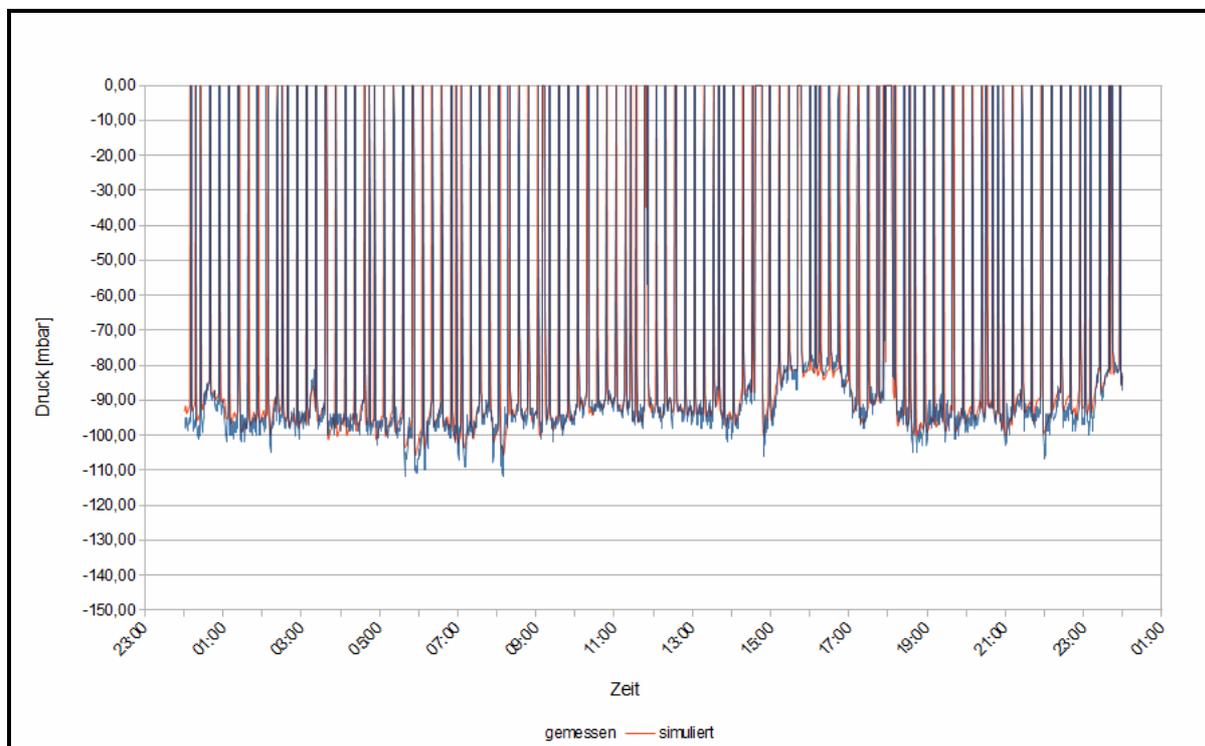
Die Filtration der KA Nordkanal wurde vom 01.11.2009 bis zum 01.01.2010 kalibriert und vom 02.01.2010 bis zum 31.01.2010 validiert. Wie in Tabelle 4-7 dargestellt, konnte die

Anlage gut nachgebildet werden, da ein mittlerer Validierungswert der Modellqualität von 86,1% erreicht wurde. Außerdem beträgt die Standardabweichung der Modellqualität während der Kalibrierung 2,9% und während der Validierung 3,2%, wodurch festgehalten werden kann, dass alle Straßen gut nachgebildet werden konnten und ein ähnliches Verhalten während der Simulation aufweisen.

**Tabelle 4-7: Kalibrierung und Validierung der KA Nordkanal**

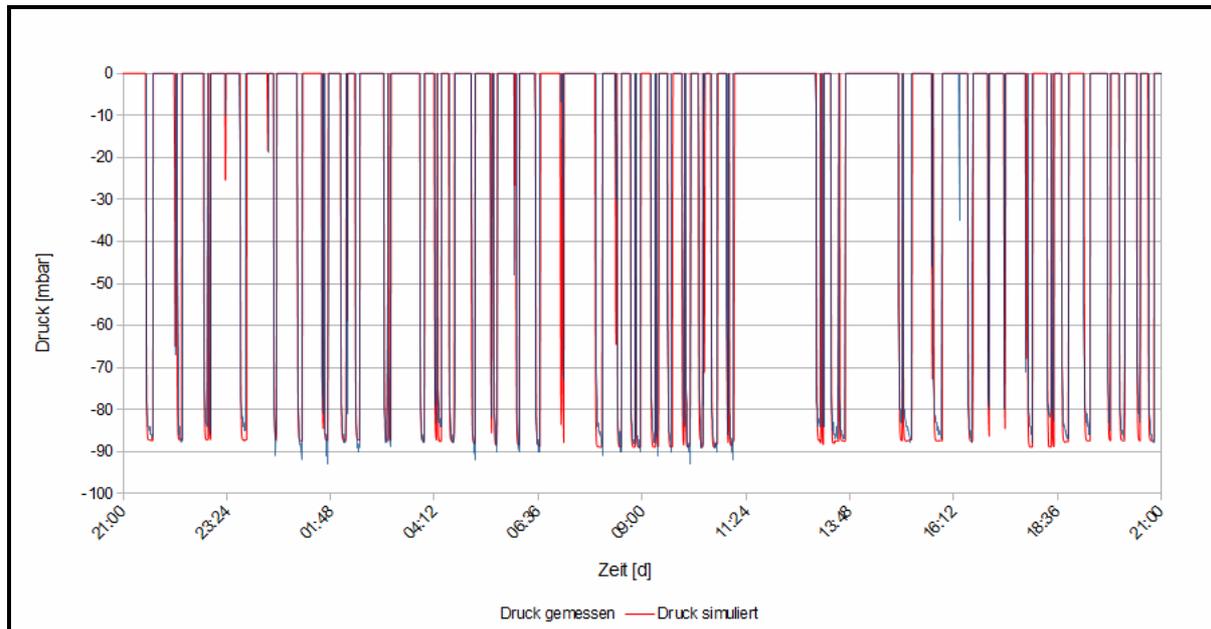
	Kalibrierung	Validierung
<b>Straße 1</b>	89,3	89,7
<b>Straße 2</b>	90,4	87,3
<b>Straße 3</b>	92,6	91,5
<b>Straße 4</b>	84,8	82,7
<b>Straße 5</b>	87,3	84,4
<b>Straße 6</b>	88,0	83,0
<b>Straße 7</b>	87,9	86,5
<b>Straße 8</b>	83,5	83,8
<b>Mittelwert:</b>	88,0 ( $\pm 2,9$ )	86,1 ( $\pm 3,2$ )

Bild 4-13 illustriert den Druckverlauf von Straße 3 am 27.11.2009 über der Zeit. Wie zu erkennen ist, wird der gemessene Druck vom Modell gut nachgebildet, wobei nur einzelne Messwertspitzen nicht genau abgeglichen werden konnten.



**Bild 4-13: Kalibrierung der KA Nordkanal Straße 1 am 27.11.2009**

Um die Ergebnisse der Validierung zu verdeutlichen, wird in Bild 4-14 die Validierung von Straße 2 vom 12.01.2010 bis zum 13.01.2010 illustriert.

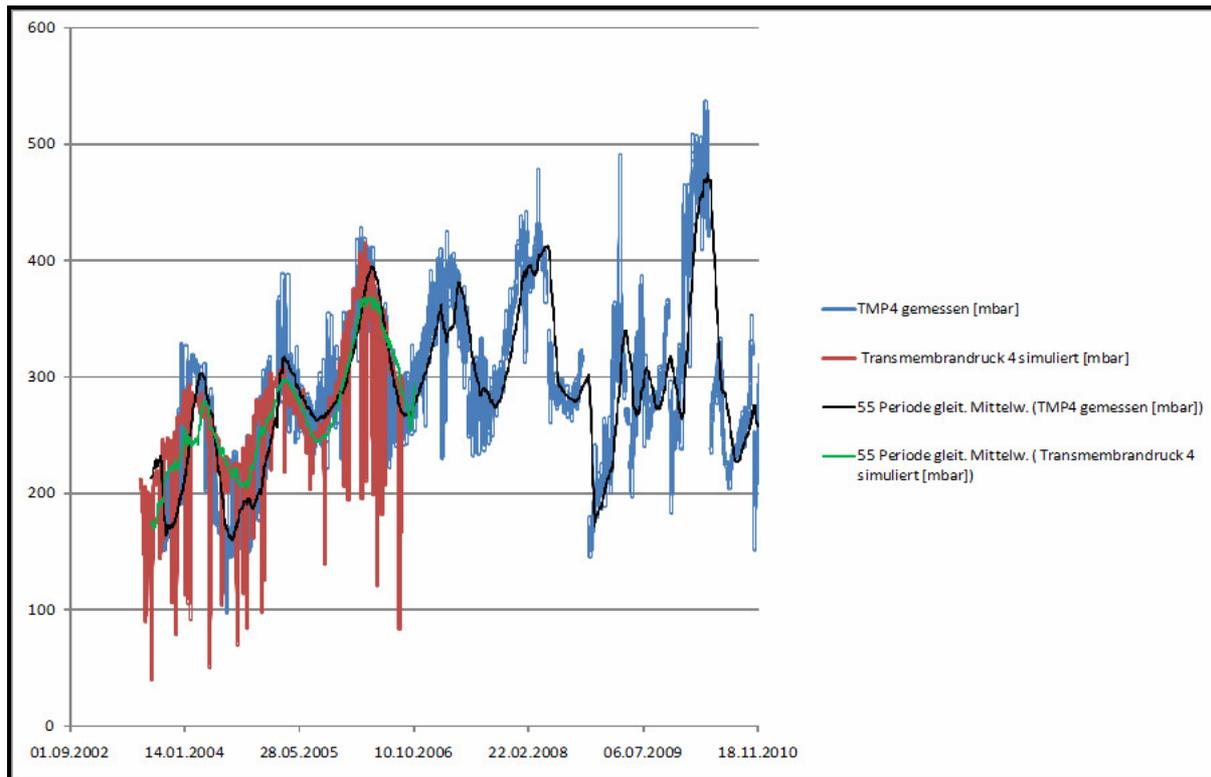


**Bild 4-14: Validierung der KA Nordkanal Straße 2 vom 12.01.2010 bis zum 13.01.2010**

Der Druckverlauf über der Zeit konnte während des Backwashes- und des Filtrationsintervalls erfolgreich simuliert werden. Nur einzelne hydraulische Lastwechsel werden nicht optimal nachgebildet. Aufgrund dieser Ergebnisse kann festgestellt werden, dass das Simulationsmodell die KA Nordkanal in dem Validierungszeitraum gut abbilden kann.

### KA Monheim

Im Gegensatz zu allen anderen kalibrierten Membrankläranlagen werden auf der KA Monheim nur Tagesmittelwerte gespeichert, wodurch das Filtrations- und das Backwashverfahren nicht berücksichtigt werden können. Damit ist eine automatische Kalibrierung und Validierung nicht möglich. Um dennoch das Anlagenverhalten nachbilden zu können, müssen die Modellparameter möglichst gut manuell eingestellt werden. Aus diesen Gründen wurde auf Basis der KA Nordkanal-Parameter das Simulationsmodell manuell kalibriert. Hierzu wurden die Tagesmittelwerte von 2003 bis 2010 genommen und, wie in Bild 4-15 dargestellt, der gemessene und der simulierte Transmembrandruck miteinander verglichen. Anhand von Parameter-Anpassungen sollten beide möglichst gut einander angenähert sein.



**Bild 4-15: Validierung KA Monheim Straße 4 von 2003 bis 2006**

In Bild 4-15 werden der gemessene gleitende Mittelwert über 55 Tage und der simulierte gleitende Mittelwert von 2003 bis 2006 verglichen. Wie an dem Verlauf der grünen Kurve zu erkennen ist, kann das Simulationsmodell trotz geringer Messdatendichte und ohne Berücksichtigung von Kurzzeiteffekten einen Langzeitverlauf erfolgreich simulieren. Daher kann das Simulationsmodell prinzipiell dazu genutzt werden, auch Langzeiteffekte zu erkennen und auf Basis alter Messdaten qualitativ vorherzusagen.

#### 4.5 Aufbau einer modellbasierten Bedienerunterstützung und des Schulungssimulators

Für viele technische Prozesse hat sich die Simulationstechnik als Optimierungs- und Trainingswerkzeug bewährt. Der Flugsimulator zur Optimierung von Flugzeugregelungen und zur Schulung des Betriebspersonals ist ein allgemein bekanntes Beispiel für diese Technologie. Auf Basis dieser Idee wurde im Projekt ein Membrankläranlagen-Simulator entwickelt, mit dem es für Anwender mit unterschiedlichem Kenntnisstand möglich ist, sich mit dem Prozess der Membranfiltration detailliert auseinanderzusetzen: Konfigurieren, simulieren sowie abschließend die Simulationsergebnisse auszuwerten.

Daher wurde dieser Simulator auf Basis des mathematischen Modells des Simulationsmodells für Membranstufen entwickelt, damit im Rahmen von Schulungen „reale“ Betriebsverläufe von vorkonfigurierten oder selbsterstellten Anlagen erzeugt werden können.

Weiterhin kann der Simulator auch als ein modellbasiertes Expertensystem und/oder modellbasiertes Agentensystem eingesetzt werden. Als Expertensysteme werden Systeme bezeichnet, welche mit Expertenwissen Probleme bzw. Aufgabenstellungen lösen können..

Durch die Nutzung des Modells werden dem Expertensystem Kenntnisse über das zu behandelnde System vermittelt. Agentensysteme sind Expertensysteme, welche sich durch direkte Interaktionsmöglichkeiten mit dem zu behandelnden System auszeichnen. Damit der Einsatz von Expertensystemen erfolgversprechend sein kann, müssen folgende Kriterien erfüllt sein:

- Das gegebene Problem muss durch das Expertensystem in einer für die Anwendung maximal zulässigen Zeit zu lösen sein.
- Die Software, welche das Expertensystem benötigt, muss auf dem PC des Kunden lauffähig sein.

Da diese beiden Kriterien für einen Einsatz von Expertensystemen bzw. Agentensystemen für das vorliegende System Membrankläranlage nicht erfüllbar sind, wurde im Projekt trotz umfangreicher Tests kein Agentensystem erfolgreich entwickelt. Die beiden Kriterien sind zur Zeit nicht erfüllbar, da bereits eine Simulationsiteration mit dem komplexen und hochdynamischen Simulationsmodell einer Membrankläranlage einen hohen Zeitaufwand auf aktueller PC-Hardware benötigt und somit eine Echtzeitunterstützung des Personals nicht umsetzbar ist. Zusätzlich zu dieser – auf längere Sicht lösbaren Problematik – kristallisierte sich während der Entwicklung noch ein anderes Problem heraus. Die optimale Umsetzungsmöglichkeit eines solchen Expertensystems erfolgt mit der Simulationsumgebung Matlab und der Real Time Toolbox, da das Simulationsmodell in Matlab entwickelt wurde und sich nur sehr aufwändig auf alternative wissenschaftliche Plattformen transportieren lässt. So wird bspw. für die Simulation der Biologie die Simulink-Toolbox Simba der IFAK verwendet, um das ASM 1 im Simulator einzusetzen. Durch die Verwendung von Matlab wird das Expertensystem für Anlagenbetreiber in der Regel unwirtschaftlich, da hohe Lizenzkosten für die Simulationsumgebung MATLAB und deren Toolboxen anfallen und somit der Einsatz vor Ort auf den Anlagen finanziell unattraktiv ist. Aus diesen Gründen wurde mehr Zeit und Entwicklungsarbeit in die folgenden beiden Einsatzszenarien investiert:

- Verwendung als Simulationswerkzeug, welches beliebig parametrierbare Simulationsläufe zulässt und welche vom Anwender nach Bedarf gestartet und ausgewertet werden können
- Verwendung des Modells in einem Simulator zu Schulungs- und Lernzwecken

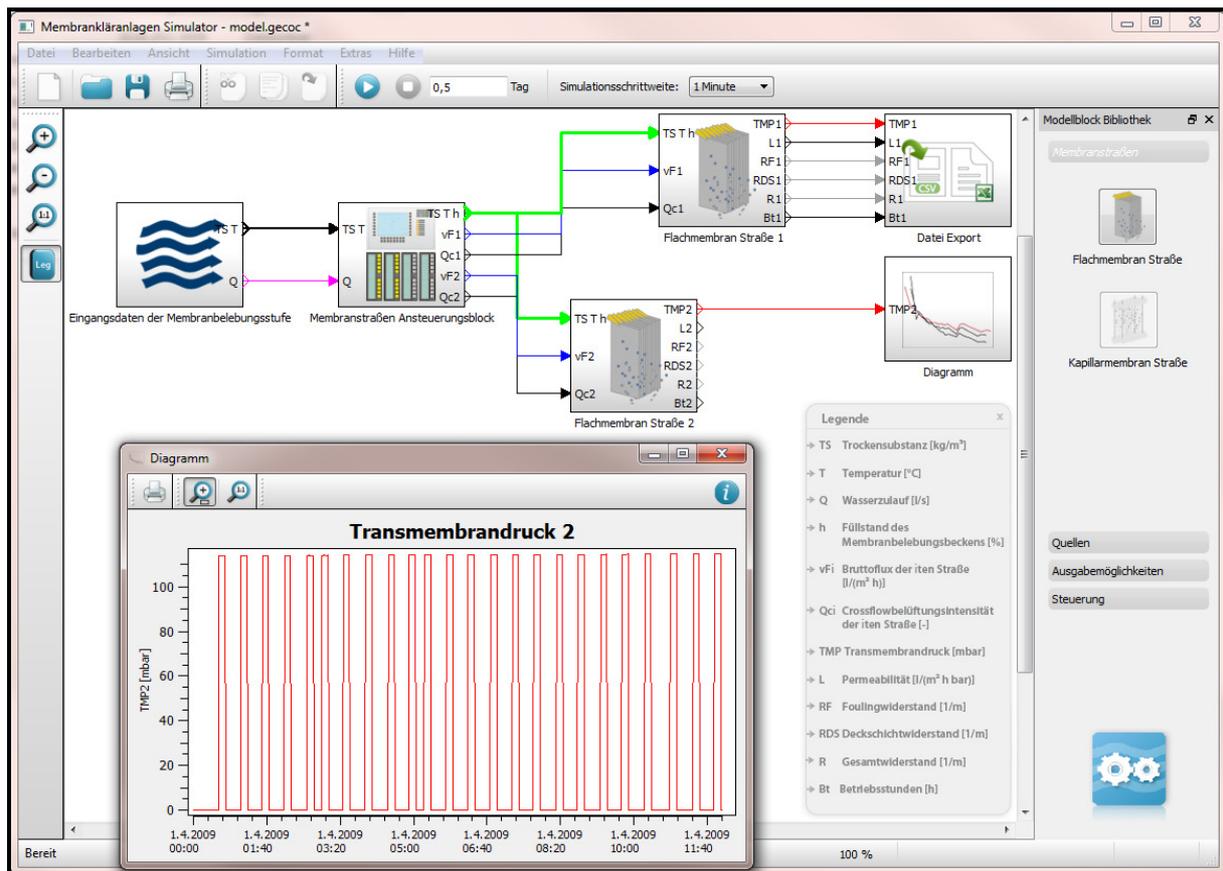
## Membrankläranlagen-Simulator

Um den unterschiedlichen Anforderungen und Kenntnissen potenzieller Anwender gerecht werden zu können, wurde bei der Entwicklung des Simulators insbesondere auf folgende Punkte Wert gelegt:

- Einfache und intuitive Bedienung
- Individuelle Anlagenkonfiguration
- Variation verschiedener Parametereinstellungen
- Visualisierung und Exportmöglichkeit der Ergebnisse
- Nutzung des mathematischen Modells der Membranstufe

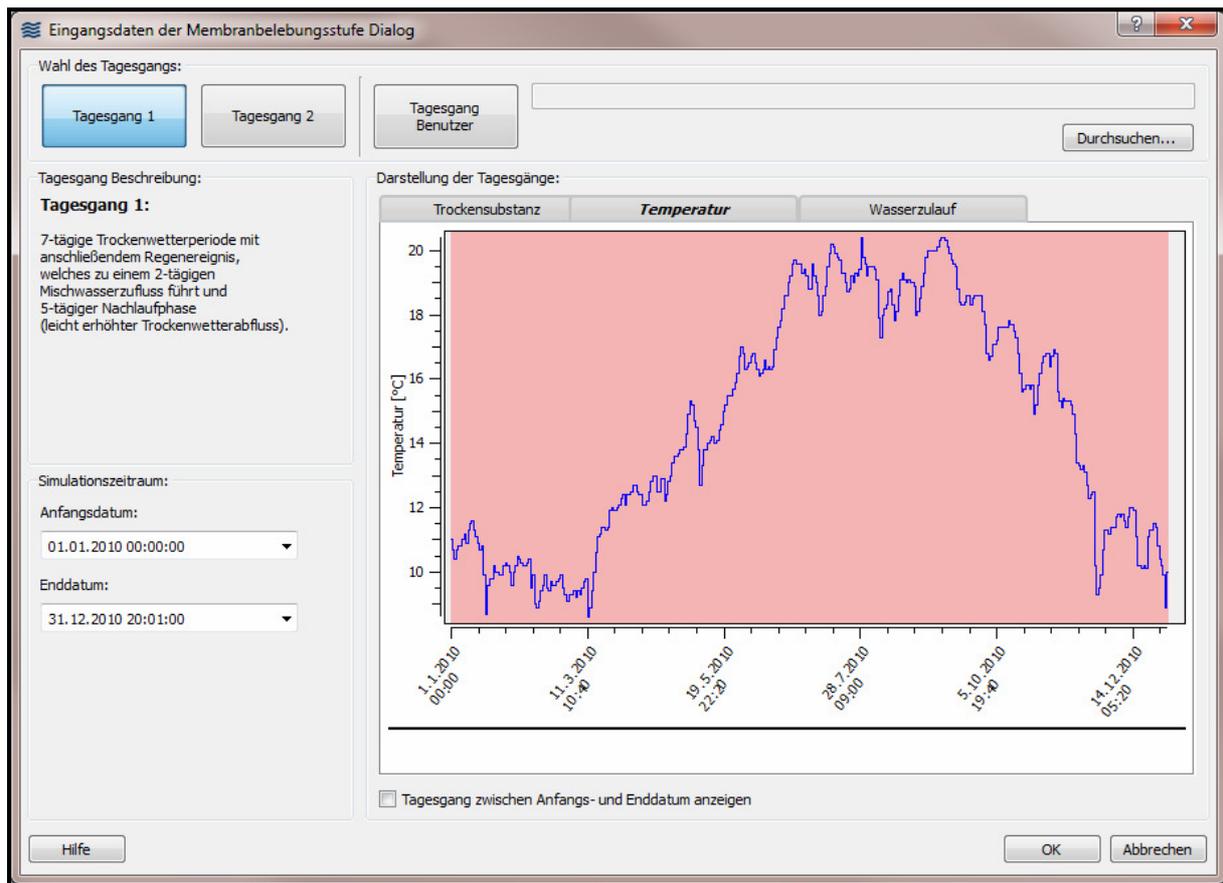
Die Basis des Membrankläranlagen-Simulators bildet das entwickelte Simulationsmodell der Membranstufe einer Membrankläranlage. Die Umsetzung des Modells der Membranstufe erfolgt im Simulator durch eine Diskretisierung der Modellgleichungen. Die eigentliche Simulation wird dann durch einen sogenannten Solver mit konstanter Schrittweite realisiert, d.h. die Modellgleichungen werden numerisch gelöst. Damit wird eine detailgetreue und realitätsnahe Simulation der Membranstufe ermöglicht, die dem derzeitigen Stand der Wissenschaft entspricht.

Im Rahmen der Entwicklung des Schulungssimulator wurde bei den monatlichen Projektmeetings der aktuelle Stand besprochen und die Empfehlungen aller Beteiligten, d.h. von Hochschulen, Ingenieurbüros und Betreibern wurden in das Programm integriert. In Bild 4-16 wird die Oberfläche des Simulators dargestellt, welches den gängigen Standardprogrammen sehr ähnelt, um die Einarbeitungszeit der Anwender minimal zu halten. Der Simulator besitzt ein Menü sowie eine Toolbar, welche die wichtigsten Elemente des Menüs über Icons zugänglich machen. Die Oberfläche selbst wurde von Studenten der Medieninformatik an der FH-Köln, Campus Gummersbach entworfen.



**Bild 4-16: Benutzeroberfläche des Membrankläranlagen-Simulators**

Jeder Modellblock besitzt ein eigenes Untermenü, über welches die Eigenschaften des ausgewählten „Blocks“ eingestellt werden können. Als Beispiel ist in Bild 4-17 das Menü des Blocks „Eingangsdaten der Membranbelebungsstufe“ dargestellt.



**Bild 4-17: Menü des Modellblocks „Eingangsdaten der Membranbelebungsstufe“**

Zur erleichterten Nutzung des Simulators wurde zusätzlich eine Legende eingefügt, welche die wichtigsten Abkürzungen der im Simulator verwendeten Begriffe erklärt. Um den Nutzer möglichst schnell mit allen nötigen Informationen zur Verwendung des Simulators zu versorgen, kann das Handbuch entweder über den Hilfeintrag des Hauptmenüs oder über die Menüs der Modellblöcke geöffnet werden. Dadurch wird direkt der Abschnitt im Handbuch geöffnet, in dem die gesuchten Informationen dokumentiert sind.

Damit Simulationsläufe über einen langen Zeitraum in einer annehmbaren Zeit ablaufen, kann die Simulationsschrittweite der gewünschten Simulationsdauer angepasst werden. Dadurch wird die Auflösung der Simulation zwar eingeschränkt, dafür können aber Langzeitsimulationen von bspw. mehreren Jahren in wenigen Minuten durchgeführt werden. Falls Kurzzeiteffekte dargestellt werden sollen, erhöht sich die Simulationsdauer entsprechend der Schrittweitenreduzierung..

Zur Auswertung der Simulationsergebnisse werden mehrere Möglichkeiten zur Visualisierung der Simulationsergebnisse angeboten. Eine detaillierte Beschreibung aller Funktionen ist dem Handbuch zu entnehmen, die wichtigsten sind nachfolgend aufgeführt. (Link zum Programm und Handbuch: <http://membran.gecoc-projects.de>).

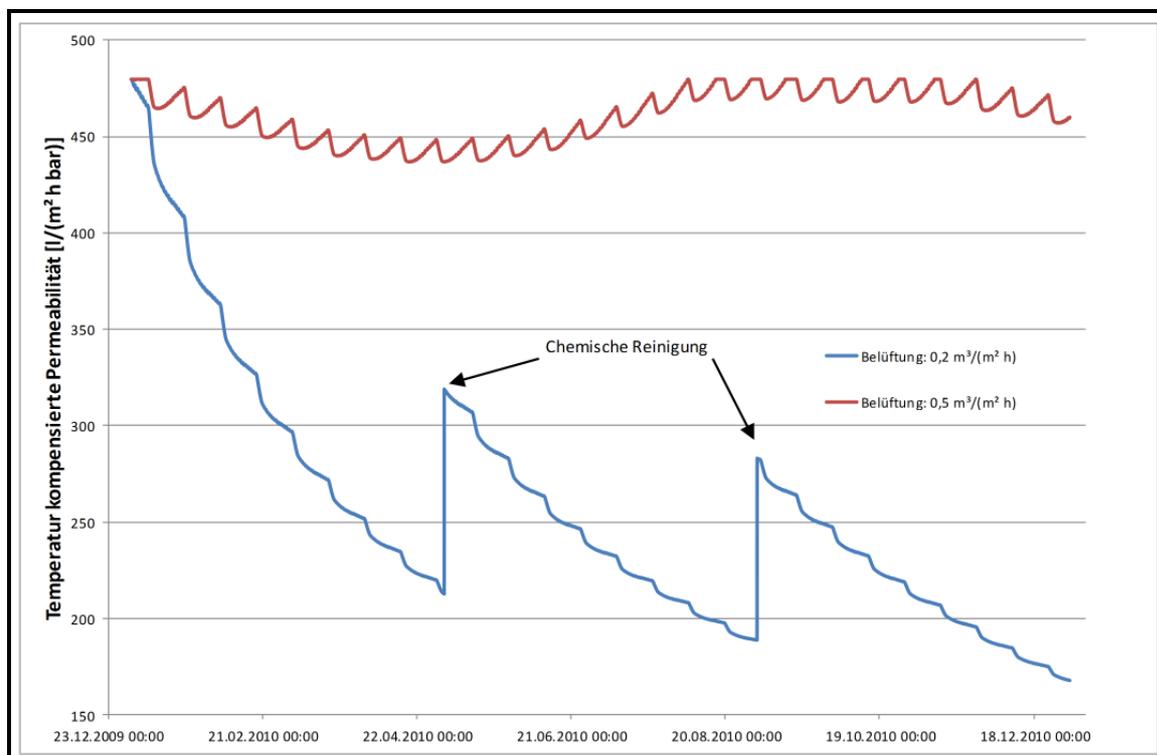
## Aufbau der Anlagenkonfiguration

Der entwickelte Simulator ist sehr vielseitig. Im Simulator können Membranbelebungsanlagen mit einer variablen Anzahl von Membranstraßen aufgebaut und parametrisiert sowie die Modellparameter anhand von Anlagendaten kalibriert werden. Um eine Kalibrierung durchführen zu können, wird der Nutzer zur „Web-Oberfläche zur Nutzung des Simulators“ geleitet, welche später detailliert beschrieben wird. Des Weiteren können auch eigene Messdaten einer Kläranlage in den Simulator eingelesen werden, so dass möglichst realitätsgetreue Simulationen durchgeführt werden können.

## Durchführung von Testläufen und Parametervariation

Der Simulator beinhaltet umfangreiche Möglichkeiten zur Durchführung von Testläufen mit unterschiedlichen Einstellungen und Vorgaben. Somit ist es möglich, das Modell der Membrankläranlage auch in Grenzbereichen zu betreiben. Beispielhafte Einstellungen sind die Variation der Stärke der Crossflowbelüftung oder die Einstellungen zur chemischen Reinigung der Membraneinheiten (Bild 4-18).

Des Weiteren kann der Simulator auch für die Suche nach optimalen Betriebsstrategien genutzt werden, soweit das Simulationsmodell in den gewünschten Betriebsregionen zuverlässige Ergebnisse liefert. Hierbei können bspw. der Filtrationszyklus sowie die Betriebsstrategie ausgewählt und damit unterschiedliche Betriebsweisen verglichen werden.



**Bild 4-18:** Testlauf mit dem Membrankläranlagen-Simulator – Vergleich unterschiedlicher Belüftungswerte und Durchführung einer chemischen Reinigung

## **Ergebnisdarstellung und -export**

Die Ergebnisse können grafisch innerhalb der Programmumgebung dargestellt werden. Zudem besteht die Möglichkeit, einzelne Werte fortlaufend anzuzeigen oder die Ergebnisse in ein Standardformat zu exportieren.

### **4.5.1 Modellumgebung**

Die Software des Membrankläranlagen-Simulators ist in der Programmiersprache C++ entwickelt. Die graphische Bedieneroberfläche des Simulators wurde mit dem Framework (Programmiergerüst) Qt realisiert (BLANCHETTE und SUMMERFIELD, 2008). Qt ist ein Framework zur Entwicklung plattformübergreifender Programme sowie grafischer Benutzeroberflächen und wird seit 2008 durch Nokia entwickelt und gepflegt (NOKIA, 2011). Qt wird durch Nokia über drei verschiedene Lizenzmodelle vertrieben. Das erste Lizenzmodell ermöglicht die Entwicklung proprietärer, also urheberrechtlich geschützter, Anwendungen und muss käuflich erworben werden. Das zweite Lizenzmodell läuft unter der „GNU ist not Unix“ (GNU) Lesser General Public License (LGPL) Version 2.1 und ist kostenlos erhältlich (GNU, 1999). Das dritte Lizenzmodell läuft unter GNU General Public License (GPL) Version 2, hierbei muss die Software komplett als OpenSource zum Download bereitgestellt werden (GNU, 1991).

Der Membrankläranlagen-Simulator nutzt Qt unter der GNU LGPL v.2.1 Lizenz. Applikationen, welche Bibliotheken unter der LGPL v.2.1 Lizenz nutzen, müssen sich an einige Vorgaben halten. Jedoch wurde der Simulator soweit vorbereitet, dass dieser unter der GNU LGPL v.2.1 Lizenz verbreitet werden kann.

## **4.6 Web-Oberfläche zur Nutzung des Simulators**

Die Internet-Technologie eröffnet Möglichkeiten zur allgemeinen, weltweiten Nutzung von softwarebasierten Simulatoren für Demonstrations- und Schulungszwecke. Zur Information über die vielfältigen Betriebsarten moderner Membranbelebungsanlagen und über die hierfür erforderlichen Steuerungs- und Regelungsstrategien sind internet-basierte Simulatoren optimal geeignet. Aus diesem Grund wurde während des Projektes eine Web-Oberfläche für den Schulungssimulator zur Bedienung und Auswertung des Modells entwickelt. Zusätzlich wird die Plattform dazu verwendet, um über Ergebnisse des Forschungsprojektes EnAM zu informieren.

Der Schulungssimulator wurde für Demonstrations- und Schulungszwecke entwickelt, dabei wurden die verwendeten Hohlfaser- und Flachmembranmodule auf Basis zweier Referenzanlagen kalibriert. Möchte ein Anlagenbetreiber seine Membrananlage im Schulungssimulator nachbauen, werden die Simulationsergebnisse jedoch nicht das lokale, d.h. das reale Verhalten der Anlage widerspiegeln, sondern das Verhalten der Referenz-

---

anlagen. Aus diesem Grund wurde eine Online-Plattform „membran.gecoc-projects.de“ (LUDWIG et al, 2011a) entwickelt, mit der ein Anlagenbetreiber die Membranmodule an seine lokale Anlage anpassen kann, damit diese das eigene Anlagenverhalten widerspiegeln. Zu diesem Zweck muss sich der Anlagenbetreiber auf der Website registrieren, um danach seine Anlage online zu konfigurieren, damit eine möglichst optimale Anlagenkalibrierung durchgeführt werden kann. Die Konfiguration der Anlage wurde in drei Bereiche unterteilt:

- Allgemeine Informationen
- Aufbau und Fahrweise der Membranbelebungsanlage
- Optional: Chemische Reinigung der Membranbelebungsanlage

Unter „Allgemeine Informationen“ werden Kontakt-, Anlage- und Firmendaten erhoben. Der Bereich „Aufbau und Fahrweise der Membranbelebungsanlage“ beinhaltet folgende Unterpunkte:

- Aufbau der Membrananlage
- Betriebsweise der Membrananlage
- Art der Anlage (kommunal/industriell)
- Membrantyp (Flachmembran oder Hohlfasermembran)
- Ausbaugröße

Hierbei ist besonders der Punkt „Aufbau der Membrananlage“ hervorzuheben, da ein Assistent dabei hilft, die Membrananlage online zu konfigurieren. Ist die Konfiguration abgeschlossen, kann bei Bedarf auch der Bereich „Chemische Reinigung der Membranbelebungsanlage“ ausgefüllt werden. Die Reinigungseffekte werden dann innerhalb des Foulingwiderstands berücksichtigt, um die Modellgüte zu verbessern. Bild 4-19 stellt die Web-Oberfläche dar, mit der eine Membrananlage angelegt werden kann.

**Bild 4-19: Eingabeformular der Membrananlagendaten**

Nachdem die Anlage im Portal erstellt worden ist, werden Messdaten benötigt, um diese zu kalibrieren. Dazu wurde der Bereich „Membrandaten hochladen“ eingerichtet, bei dem die Messdaten in einer comma-separated-values (CSV) Datei zum Server gesendet werden können. In diesem Format werden Messdaten spaltenweise aufgelistet und durch ein Trennzeichen (z.B. Tabulator) voneinander unterschieden. Um sicher zu stellen, dass nur benötigte Messdaten gespeichert werden, wurde eine Vorlage entwickelt, welche in Tabelle 4-8 dargestellt wird.

**Tabelle 4-8: Erforderliche Messdaten für die Kalibrierung**

Messdaten	Modul/Element	Straße	Anlage	Zeichen	Einheit / Format
Transmembrandruck	x	-	-	TMP	mbar
Temperatur	-	x	-	T	°C
Füllstand	-	x	-	L	%
Durchfluss Permeat	x	-	-	Q_p	l·s <sup>-1</sup>
Zulauf zum MBR	-	-	x	Q_zu	l·s <sup>-1</sup>
Trockensubstanz	-	x	-	TS	kg·m <sup>-3</sup>
Unterdruck	x	-	-	P	mbar
Permeabilität	x	-	-	F	l·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ·bar <sup>-1</sup>
Zeit/Datum	x	x	x	t	dd.MM.YYYY HH:mm:ss
spez. Crossflow	-	x	-	Q_c	m <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup>
Backwash	x	-	-	Q_b	m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>

Anhand dieser Tabelle werden die Messdaten zugeordnet. Damit diese Zuordnung für den Anwender möglichst problemlos funktioniert, wird nach dem Hochladen der CSV-Datei ein Vorschaufenster visualisiert, welches die Zuordnung der Messdaten erlaubt, wie in Bild 4-20 erkennbar.

The screenshot displays a 'File Upload' dialog box with the file 'test3\_viel.csv (26.13 MB)' selected. Below it, 'Datei-Informationen' shows 66 columns and 43681 rows. A dropdown menu on the right lists various measurement data points for assignment, such as 'S1: T [°C]', 'S1-E1: Q\_p [l/s]', and 'S2: L [%]'. Below the dialog, a data preview table is shown with columns for 'Zeitpunkt', 'MW2696', 'MW2697', 'MW2698', 'MW2706', and 'MW2711'. The table contains five rows of data, with the first row starting at '01.04.2008 00:00:00' and values ranging from 0.035613 to 16.023742. The caption below the screenshot reads 'TABELLE 1: UPLOADED FILE TEST3\_VIEL.CSV.TMP'.

**Bild 4-20: Messdaten zuordnen und zum Server senden**

Die Bezeichnung „S1“ bezieht sich auf die vorher konfigurierte Anlage und bedeutet Straße 1. Hat eine Straße mehrere Elemente, dann wird die Abkürzung „S1-E1“ verwendet, wobei die Zahl hinter dem „E“ das zu verwendende Modul oder Element symbolisiert. Nach der erfolgreichen Zuordnung werden die Messwerte in einer Datenbank gespeichert.

Sobald die Messdaten hochgeladen wurden, können die Daten analysiert und ausgewertet werden. Aufbauend auf dieser Auswertung wird die konfigurierte Membrananlage mit dem MATLAB-Simulationsmodell kalibriert und der Anlagenbetreiber erhält die Ergebnisse per Email in einer Datei, welche in das Membranmodul im Schulungssimulator importiert werden kann, um eine optimale Simulation der Anlage zu erreichen.

Mit dieser Plattform wurde eine einfach zu handhabende Web-Oberfläche entwickelt, mit deren Hilfe Anlagenbetreiber die Möglichkeit haben sehr schnell und effektiv eine bestehende Membrananlage für die Schulungssimulation zu kalibrieren. Das Einrichten der Anlage muss nur einmalig erfolgen, so dass der Kalibrierungsaufwand dauerhaft minimiert wird. Als Basis für den Einrichtungsassistenten wurde ein Eingabeformular entwickelt, das bereits erfolgreich bei mehreren Betreibern zum Einsatz kam, um Messdaten für das Simulationsmodell zu erheben.

## 4.7 Optimierung der Prozessregelung

Die Kenntnis des dynamischen Verhaltens von Membranbelebungsanlagen und die daraus abgeleitete Steuerung und Regelung eines derartigen Systems ist Voraussetzung für den optimalen Betrieb dieser Technologie. Die Simulation kann einen entscheidenden Beitrag zum wirtschaftlichen Betrieb von Membrankläranlagen leisten, denn unterschiedliche Betriebsparameter lassen sich in der Computersimulation schneller und ohne Gefährdung der realen Anlage bis in Grenzbereiche testen und optimieren. Auch der Einfluss der Parameter auf Durchsatz und Reinigungsleistung der Anlage ist per Simulation oft klarer zu identifizieren als im praktischen Versuch.

Um die nicht-linearen, dynamischen Zusammenhänge zwischen den Prozessgrößen an der Membran darzustellen, sind umfangreiche mathematische Berechnungen notwendig. Dadurch ist ein komplexes Simulationsmodell entstanden, mit dem neben systemtechnischen Untersuchungen auch Methoden zur modellbasierten Optimierung von Parametern für die Regelung von Membrankläranlagen entwickelt wurden. Zu den verwendeten Regelungsparametern gehört bspw. die optimale Auslegung der Betriebs- und Pausenzeiten für den Aufstaubetrieb bei geringen Abwasserzuflüssen,

Anhand des entwickelten Modells für die Membranstufe werden der Einfluss von Filtrations- und Relaxationszeiten auf den Filtrationsprozess sowie der optimale Filtrationsfluss bestimmt (LUDWIG et al, 2011b). Die Optimierung dieser Regelungsparameter wird anhand des Simulationsmodells der Membrankläranlage Seelscheid durchgeführt. Eine Umsetzung der Ergebnisse in das Betriebskonzept der Membrankläranlage Seelscheid und damit auf das allgemein nutzbare Automatisierungssystem, wurde bis dato teilweise, anhand des Fuzzy-Reglers, vollzogen. Alle Optimierungsmethoden konnten in der Projektlaufzeit nicht auf der realen Anlage durchgeführt werden, da für einen optimalen Erkenntnisgewinn längere

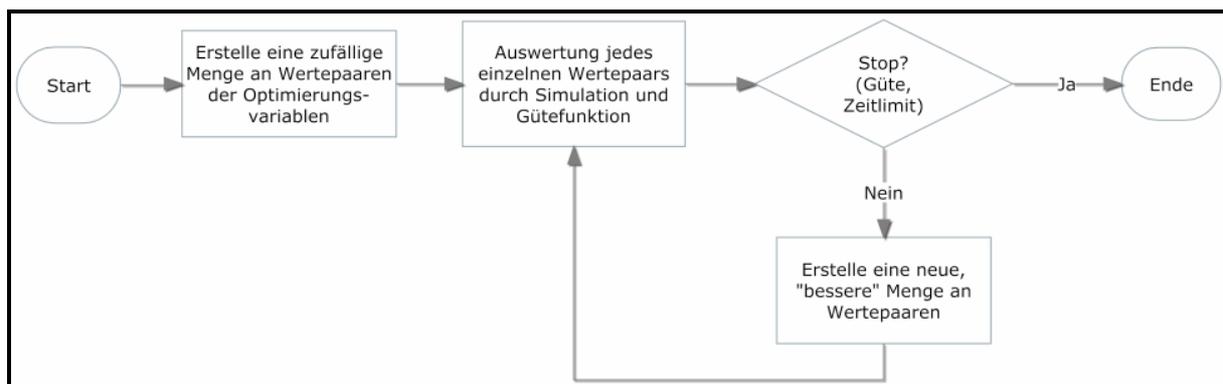
Versuchsdurchführungen benötigt werden, welche aufgrund der technischen Komplexität des Modells nicht durchführbar waren.

Beispielhaft wurden folgende Optimierungsaufgaben mit dem Simulationsmodell untersucht:

1. Dauerfiltration unter Variation der Zykluszeiten
2. Filtration eines typischen Tagesgangs im Frühjahr unter Variation der Zykluszeiten
3. Filtration einer Gesamt-Wassermenge unter Variation der Filtrationsmenge je Zyklus bei konstanten Zykluszeiten

Um diese Optimierungsprobleme zu lösen wurden Genetische Algorithmen (GA) verwendet, welche auch nicht analytisch lösbare Probleme behandeln können, indem sie wiederholt verschiedene „Lösungsvorschläge“ generieren. Dazu werden Optimierungsvariablen (d.h. was kann verändert werden?), sowie Ziel- bzw. Gütefunktion (d.h. was soll optimiert werden?) definiert um dann zufällig Wertepaare der Optimierungsvariablen zu erstellen. Hierbei wird für jedes Wertepaar eine Simulation mit dem Modell durchgeführt und das Simulationsergebnis an Hand der Gütefunktion ausgewertet.

Mit dieser Information (Zuordnung der Wertepaare zudem Simulationsergebnis) kann anschließend eine Optimierungsmethode weitere Wertepaare erzeugen, welche den Informationsgewinn optimiert und damit zum Finden einer optimalen Lösung führt (s. Bild 4-21). Es werden so lange Wertepaare erzeugt und mittels Simulation bewertet, bis mindestens ein Wertepaar eine festgelegte, erforderliche Güte aufweist oder die maximale Anzahl an Simulationen erreicht wurde. Das bis dahin beste Wertepaar wird dann als Lösung des Optimierungsproblems herangezogen.



**Bild 4-21: Zielfunktion der Optimierungsprobleme**

Die Zielfunktion bzw. Gütefunktion, welche bestimmt was optimiert werden soll, ist für alle drei untersuchten Optimierungsaufgaben identisch und soll hier kurz beschrieben werden. Das Ziel der Optimierungsaufgaben ist, folgende Optimierungskriterien bestmöglich zu erfüllen:

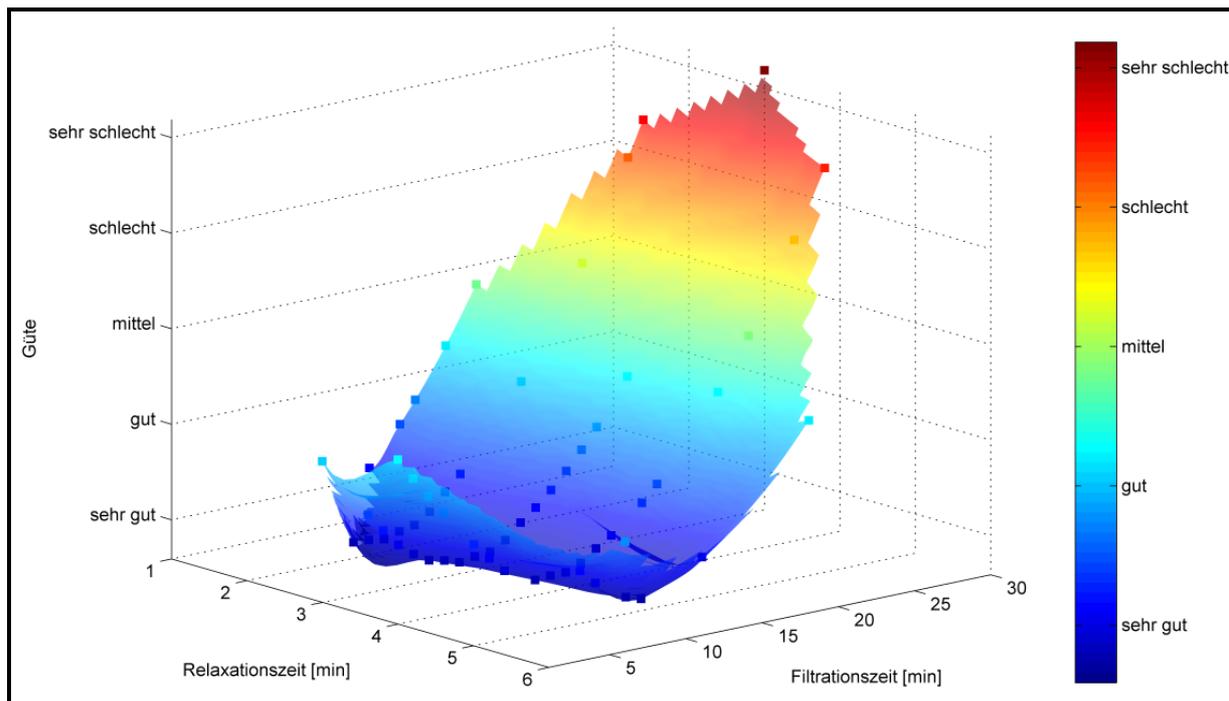
- Maximiere zeitliches Integral über das filtrierte Permeat
- Minimiere zeitliches Integral über den Transmembrandruck Verlauf
- Minimiere die benötigte Menge an Crossflow-Belüftung

Diese drei Optimierungskriterien werden über Faktoren gewichtet, d.h. die Terme werden mit Faktoren multipliziert und dann addiert. Die sich ergebende Größe definiert damit die Güte der durchgeführten Simulation. Die Güte kann so interpretiert werden, dass möglichst viel Wasser mit möglichst geringem Energie- und damit Kostenaufwand filtriert werden soll. Die Gewichtungsfaktoren sind in der Praxis gemäß der zu erreichenden Kosteneinsparung bei Optimierung des entsprechenden Kriteriums zu wählen.

Da alle drei Terme in verschiedenen physikalischen Einheiten gemessen werden, ist der Gewichtungsfaktor die Umrechnung von der physikalischen Größe in Kosten. Damit können alle Terme in einer definierten Zieleinheit wie bspw. Kosten in Euro ausgedrückt werden. Die Optimierungsaufgaben und deren Ergebnisse werden im Folgenden diskutiert.

#### **4.7.1 Dauerfiltration unter Variation der Zykluszeiten**

Bezüglich des Energieverbrauchs und der Effektivität einer Membrankläranlage ist die Filtration des Abwassers mit Hilfe der Membran der entscheidende Prozess. Daher sollten in einem Optimierungsszenario die Zykluszeiten gesucht werden, welche für eine Dauerfiltration möglichst optimal sind. So sollen in diesem Szenario 1750 Filtrationszyklen im Dauerbetrieb gefahren werden, d.h. Filtration und Relaxation finden nacheinander ohne Pause statt. Dabei sollen die Filtrations- und Relaxationszeiten variiert werden, um die optimalen Zykluszeiten für solch einen Dauerbetrieb zu ermitteln.



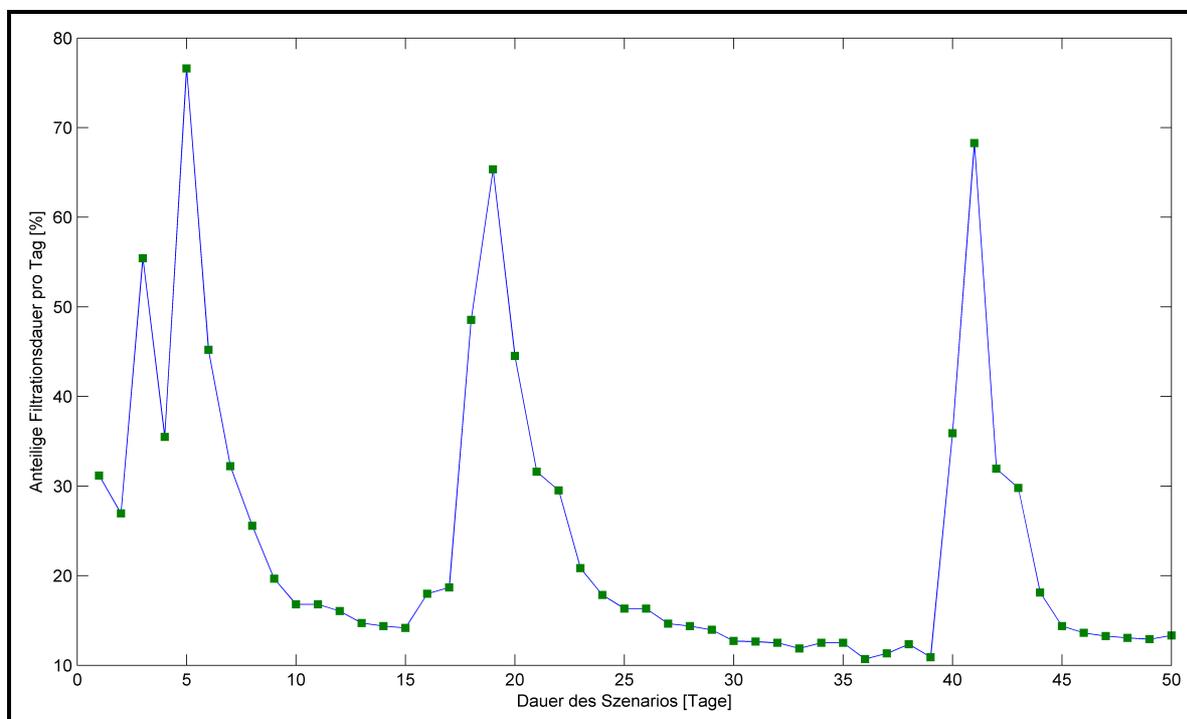
**Bild 4-22: Ergebnis der Dauerfiltration unter Variation der Zykluszeiten**

In Bild 4-22 wird das Ergebnis für dieses Optimierungsproblem gezeigt. Aufgetragen ist die durch die Simulation ermittelte Güte über die untersuchten Relaxations- und Filtrationszeiten. Dargestellt als Quadrate sind die Ergebnisse der durch die Optimierungsmethode durchgeführten Simulationen. Als farbliche Fläche ist der aus den Punkten approximierter Verlauf der Güte der einzelnen Simulationen abgebildet. Wie zu erkennen ist, wird die Güte bei längerer Dauerfiltration und unabhängig von den Relaxationsphasen nach Durchlaufen eines Optimums immer schlechter. Das Modell zeigt somit auf, dass der Filtrationszyklus nicht linear ist und je nach eingesetzter Membran ein starkes Optimierungspotential besitzt. Die idealen Relaxations- und Filtrationsintervalle werden jedoch hauptsächlich von der Zielfunktion beeinflusst, wodurch kein „gutes“ oder „schlechtes“ Ergebnis eindeutig bestimmt werden kann. Aufgrund der stark variierenden lokalen spezifischen Randbedingungen, muss die Zielfunktion entsprechend angepasst werden.

Damit ist die Möglichkeit gegeben, bei Wahl entsprechender Parameter für jeden Membrantyp per Simulation eine auf den Typ angepasste optimale Filtrationszeit abzuschätzen. Somit wird der Übergang von der zeitraubenden, rein experimentellen Komponentenoptimierung zum simulations-basierten geregelten Vorgehen ermöglicht.

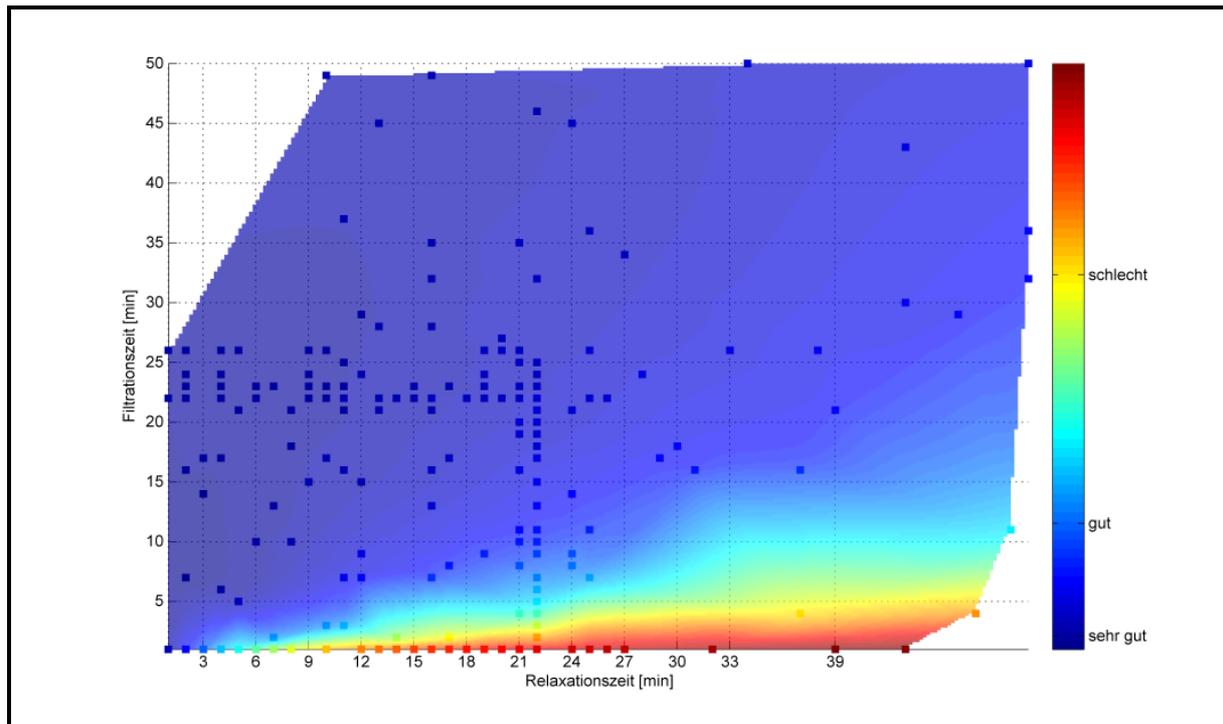
## 4.7.2 Filtration eines typischen Tagesgangs im Frühjahr unter Variation der Zykluszeiten

Da die Dauerfiltration kein typischer Betrieb ist, sondern nur eine Ausnahme darstellt, soll in diesem Ansatz eine realistischere Situation optimiert werden. Dazu wurden experimentell ermittelte Daten über die Filtrationszeiten der Membrankläranlage Seelscheid über einen Zeitraum von 50 Tagen als Referenz herangezogen. In Bild 4-23 wird die Filtrationsauslastung der Membraneinheit „Links Oben“ der Membranstraße 1 über diesen Zeitraum visualisiert. Auf der Ordinate ist die anteilige Filtrationsdauer bezüglich der maximal möglichen Filtrationszeit pro Tag aufgetragen. D.h. ein Wert von 50 % sagt aus, dass die Hälfte des Tages filtriert und die andere Hälfte des Tages relaxiert und pausiert wurde. Aus Bild 4-23 ist zu entnehmen, dass die Belastung, bedingt durch Variationen im Zulauf sehr stark schwankt. Für diesen Zeitraum sollen nun die optimalen Zykluszeiten bestimmt werden.



**Bild 4-23: Auslastung der Membraneinheit „Links Oben“ der Membranstraße 1 der Membrankläranlage Seelscheid. Zeitraum: 05.03.2009–24.04.2009**

Je nach Auslastung wurde das Zyklus- zu Pausenverhältnis je Tag eingestellt und entsprechend den gewünschten Zykluszeiten simuliert. D.h. in jeder Simulation wurde die geforderte Wassermenge mit unterschiedlichen Zykluszeiten filtriert. Wie in Bild 4-24 gesehen werden kann, gibt es eine deutliche Abhängigkeit bezüglich der Filtrations- und Relaxationszeit.



**Bild 4-24: Filtration eines Tagesgangs unter Variation der Zykluszeiten (Blick aus der Vogelperspektive auf das Optimierungsergebnis)**

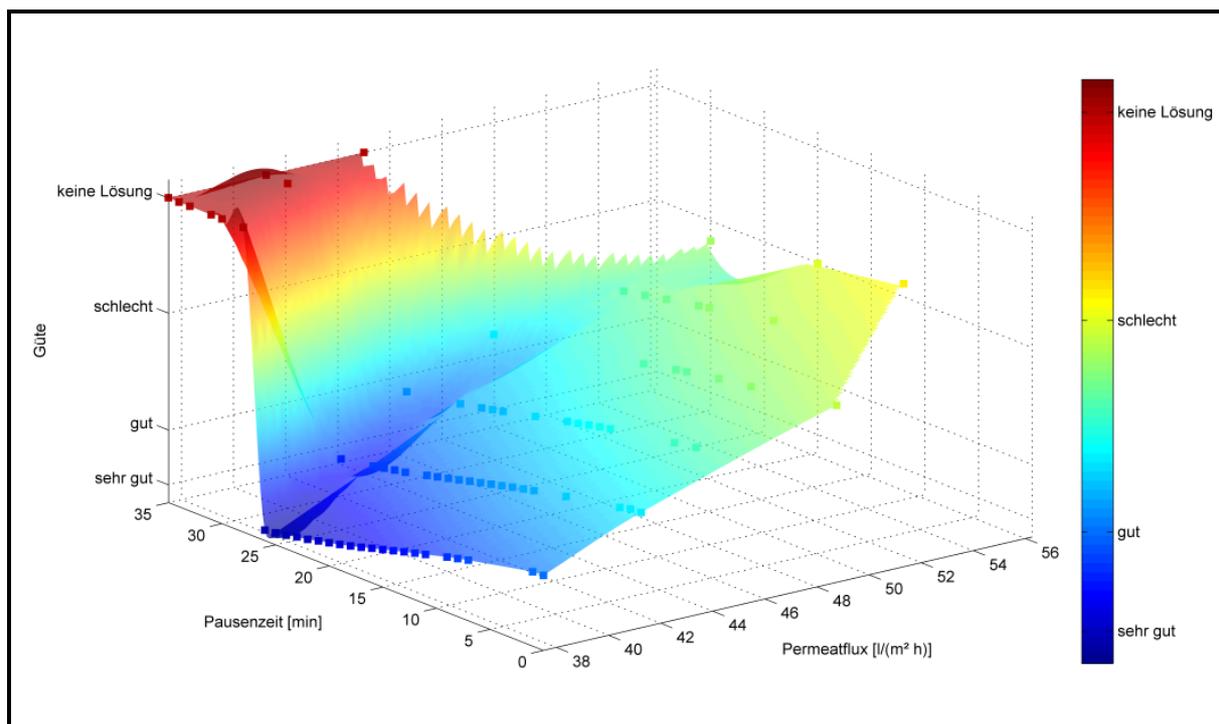
Da in diesem Fall die Anlagenbelastung der Membrankläranlage Seelscheid sehr starken Schwankungen unterliegt, ist das Optimierungsergebnis zwangsläufig ein Kompromiss zwischen den je nach Betriebszeitpunkt unterschiedlichen Anforderungen. Um ausreichende Flexibilität im Betrieb zu erreichen, sollten die Zykluszeiten je nach zu erwartender Belastung angepasst werden, um jederzeit einen möglichst optimalen Filtrationsprozess zu gewährleisten. Im aktuellen Entwicklungsstand des Modells können hierzu noch keine gesicherten Aussagen gemacht werden, allerdings zeigt die bisher gewonnene Erfahrung mit dem Modell und den Optimierungsergebnissen, dass solch eine adaptive Prozessstrategie grundsätzlich für dieses Szenario geeignet ist. Da der Betrieb des Modells in Echtzeit bisher nicht erfolgreich umgesetzt werden konnte, wäre dies ein weiterer Forschungsansatz zu einem späteren Zeitpunkt, sobald dies mit ausreichend leistungsfähiger PC-Hardware umzusetzen ist.

#### **4.7.3 Filtration einer Gesamt-Wassermenge unter Variation der Filtrationsmenge je Zyklus bei konstanten Zykluszeiten**

Um die anfallenden Wartungskosten für Membrane zu minimieren und die Anlage trotzdem optimal auszulasten, wurde ein weiteres Optimierungsszenario analysiert, bei dem für eine vorgegebene Menge Wasser der optimale Permeatflux ermittelt werden soll. So stellt sich die Frage, ob das Permeat mit einem möglichst hohen Flux und anschließend langen

Pausenzeiten gewonnen werden soll oder ob ein geringer Flux und kürzere Pausenzeiten optimaler sind.

Damit dieses Optimierungsproblem „mit welchem Flux und welcher Pausenzeit, die zwischen den Zykluszeiten liegen, sollte filtriert werden?“ gelöst werden kann, wurde eine definierte Wassermenge vorgegeben, die innerhalb von 50 Tagen abfiltriert werden soll. Als Randbedingung wurden die Zykluszeiten (Filtration: 9 min. und Relaxation: 1 min.) sowie die Crossflow-Belüftung konstant gehalten.



**Bild 4-25: Ergebnis des Optimierungsproblems: Filtration einer Gesamtwassermenge unter Variation der Filtrationsmenge je Zyklus bei konstanten Zykluszeiten**

Das Ergebnis dieses ersten Optimierungsversuchs wird in Bild 4-25 illustriert. Aufgetragen ist die Güte über die Pausenzeiten und dem filtrierten Volumenstrom  $Q$ . Der rote Bereich („keine Lösung“) zeigt Punkte an, welche die Gütefunktion nicht erfüllen, d.h. bei niedrigen Flüssen und hohen Pausenzeiten kann die geforderte Wassermenge in dem Zeitraum nicht mehr filtriert werden. Das Modell zeigt somit auf, dass es am besten ist mit einem möglichst minimalen Flux auf Kosten kürzerer Pausenzeiten zu filtrieren. Jedoch kann aufgrund dieser Ergebnisse keine allgemeingültige „gute“ oder „schlechte“ Pausenzeit in Abhängigkeit des filtrierten Volumenstromes bestimmt werden. Aufgrund der stark variierenden hydraulischen Anlageneigenschaften ist die Zielfunktion von der Gewichtung der einzelnen Optimierungskriterien über die lokalen Eigenschaften abhängig. Deutlich ist die extreme Relevanz dieser Parameteroptimierung für den Anlagenbetrieb zu erkennen: Optimaler

Betrieb und extrem schlechter Betrieb liegen nahe beieinander. Wenn berücksichtigt wird, welche Probleme in der Praxis bei einer rein empirischen Parameteroptimierung auftreten – Stichwort: „Never change a running system“ - dann zeigt diese Rechnung deutlich das enorme Potential dieser Prozesssimulation. Zur Absicherung der Ergebnisse sollten diese Resultate noch im Langzeitversuch auf einer Membrankläranlage für verschiedene Membranen mit unterschiedlicher Auslegung validiert werden.

Die Ergebnisse zeigen eindeutig das große Optimierungspotential mit entsprechender Energieeinsparung, das durch die modellbasierte Parameteroptimierung erreichbar ist.

#### **4.8 Nutzung zu Schulungszwecken**

Die deutlich komplexere Technik von Membrankläranlagen macht Steuer- und Regeleingriffe zu einer schwierigen und allein mit empirischer Betriebserfahrung kaum zu beherrschenden Aufgabe. Prozesseingriffe müssen nicht nur auf ihre aktuellen Auswirkungen, sondern auch auf mittelfristige Effekte hin bewertet werden. Daher ist es wichtig, insbesondere dem Anlagenpersonal dieses breite Wissensgebiet möglichst umfassend und anschaulich zu vermitteln.

Sowohl in der Planungsphase als auch im Betrieb von Membrananlagen soll eventuellen Schwachstellen und Schwierigkeiten durch ein gezieltes und effektives Training vorgebeugt werden. Daher wurde während des Projektes besonders Wert auf die Gestaltung und Planung von nachhaltigen Trainingsmöglichkeiten gelegt, welche z.B. durch Präsenzschulungen im Rahmen von simas oder durch Onlineschulungen, basierend auf dem Schulungssimulator, repräsentiert werden.

Während der Projektlaufzeit wurden mehrere Workshops durchgeführt, um ein geeignetes Trainingswerkzeug auf Basis der EnAM-Ergebnisse zu gestalten sowie dessen Nachhaltigkeit zu überprüfen. So wurde im Dezember 2009 ein Workshop an der FH-Köln, Campus Gummersbach zur Einführung in das Matlab-Simulationsmodell durchgeführt, um die mathematischen Zusammenhänge allen Projektpartnern zu verdeutlichen und um frühzeitig das Fachwissen von Ingenieurbüros und Abwasserverbänden in das Simulationsmodell einfließen zu lassen.

Aufbauend auf den Erfahrungen dieser Schulung wurde der Membrankläranlagensimulator als Schulungsinstrument sowie als flexibles und vielseitiges Simulationstool entwickelt. Dieser Simulator soll nicht nur für simas-Präsenzschulungen, sondern auch zur Onlineschulung genutzt werden. Die Software wird unter „<http://membran.gecoc-projects.de>“ zum kostenlosen Download angeboten. Mit Hilfe des umfangreichen Handbuchs besteht die Möglichkeit, das Wissensspektrum der Membrantechnik in zeitgemäßer Form kennen zu lernen.

Um den Erfolg und die Wirksamkeit des Membrankläranlagensimulators in der Praxis zu testen, wurde unter anderem im Januar 2011 in Seelscheid eine Schulung von Studenten verschiedener Fachrichtungen im Rahmen von simas zum Thema Membrantechnik durchgeführt, bei der die folgenden Themen ausführlich behandelt wurden:

- Grundlagen der Membrantechnik
- Vorstellung der Membrankläranlage Seelscheid
- Membrankläranlagensimulator: Simulation und Optimierung

So konnten die Teilnehmer während dieser Schulung Ihre Membrankenntnisse in Theorie und Praxis vertiefen und gleichzeitig für diese innovative Technik sensibilisiert werden. Durch die Integration des Membrankläranlagensimulators konnte fundiertes Fachwissen zur Simulation und Optimierung von Membrankläranlagen vermittelt werden. Da die Schulungsressourcen Online zur Verfügung stehen, können sich die Teilnehmer jederzeit von zu Hause aus die Software am heimischen PC herunterladen und selbstständig den vermittelten Wissensstoff nacharbeiten und somit nachhaltig verinnerlichen.

Des Weiteren wurde im März 2011 der Membransimulator erstmalig im Rahmen der simas-Schulung „Basismodul für das Betriebspersonal“ bei den „Praktikern“ vorgestellt. Es konnten während der Schulung eine Anlage nach Angabe der Teilnehmer konfiguriert und verschiedene Betriebseinstellungen erfolgreich simuliert werden.

Anhand positiver Rückmeldungen sollen folgende Trainingsanwendungen auch nach Projektende intensiviert und durchgeführt werden:

- Bei simas Schulungen
- Im Rahmen von Präsenzworkshops zur Sensibilisierung der Membrantechnik für Studenten an der FH-Köln im Fachbereich Automation and IT

#### **4.9 Allgemeingültige Grundlagen für Automatisierungssysteme und Simulationsmodelle**

Aus den Bestandsanalysen zur Mess- und Regelungstechnik und den in Seelscheid umgesetzten Optimierungsmaßnahmen lässt sich hinsichtlich eines weitgehend allgemein gültigen Ansatzes zur Überwachung und zum automatisierten Betrieb einer Membranbelebungsanlage folgendes System ableiten:

Grundsätzlich erscheint es sinnvoll, die Aufgaben der biologischen Abwassereinigung von der Abtrennung des belebten Schlammes soweit wie möglich zu trennen. Dies ist für Membranfiltrationssysteme mit hoher Packungsdichte (z.B.  $> 150 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ), definiert als verfügbare Membranfläche bezogen auf das zum Betrieb der Filtrationsanlage mindestens

---

erforderliche Reaktorvolumen in  $\text{m}^2/\text{m}^3$ , als nachgeschaltetes System und sich daraus ergebenden kleinen Membranbecken relativ einfach. Hingegen führen vor allem Systeme mit Flachmembranen bei spezifischen Werten von ca.  $50 \text{ m}^2/\text{m}^3$  zu größeren Membranbecken. Das DWA-Merkblatt M 227 „Membranverfahren in der kommunalen Abwasserreinigung“ (Entwurfassung Mai 2011) zeigt auf, in welchem Maße der belebte Schlamm in den Membranbecken bzw. das Reaktorvolumen für die Bemessung von Membranbelebungsanlagen eingerechnet werden kann.

Weitgehend unabhängig hiervon sind jedoch die spezifischen Belange der einzelnen Verfahren zur Abwasserreinigung und zur Filtration getrennt voneinander zu überwachen und zu steuern bzw. regeln. Im Einzelfall und insbesondere für Systeme mit geringer Packungsdichte kann es dabei zu einer größeren Schnittmenge der einzelnen Prozesse kommen, da ein Teil der biologischen Abwasserreinigung in die Membranbecken verlagert werden könnte.

#### **4.9.1 Überwachung einer Membranbelebungsanlage**

Der Betrieb des biologischen Teils einer Membranbelebungsanlage umfasst den Teil der Belebungsbecken zur Abwasserreinigung sowie die Filtrationsanlage. Die Eigenüberwachung dient neben dem vordringlichen Schutz der installierten Einrichtungen auch als Grundlage der Automatisierung und sollte gemäß Tabelle 4-9 daher mindestens folgenden Umfang aufweisen:

**Tabelle 4-9: Vorgaben zur Eigenüberwachung einer Membranbelebungsanlage**

Belebungsbecken	Zufluss	kontinuierlich	
	Feststoffgehalt	kontinuierlich	
	mikroskopisches Bild	wöchentlich	
	Sauerstoffgehalt	kontinuierlich	
	NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N, PO <sub>4</sub> -P	kontinuierlich	(≥ 10.000 EW)
	Temperatur	kontinuierlich	
	Niveau in den Becken	kontinuierlich	
	Menge der Rezirkulation oder Beschickung	kontinuierlich	
	Betriebszeiten	kontinuierlich	Rührwerke, Gebläse
Filtrationsanlage	Feststoffgehalt	kontinuierlich	je Einheit
	Permeatmenge	kontinuierlich	für jede Einheit separat
	Betriebszeiten	kontinuierlich	alle Aggregate
	Niveau in den Kammern	kontinuierlich	
	Trübung	kontinuierlich	je Straße
	Druckmessungen	kontinuierlich	in den Permeatleitungen
	Permeabilität	kontinuierlich	Berechnung eines täglich repräsent. Wertes je Einheit
	pH-Wert	kontinuierlich	bei kritischen Anwendungen
	Chemikalienverbrauch	bei Anwendung	je Reinigung/Beschickung
	hygienische Beschaffenheit	monatlich	gem. rechtlicher oder technischer Vorgabe
	pH-Wert Reinigungslösungen	bei Anwendung	
	Luftmenge/ bzw. -durchfluss	kontinuierlich	zur Sicherung der min. CF-Belüftung
	Betriebszeiten	kontinuierlich	
Leistungsaufnahme	kontinuierlich		
Permeat	pH-Wert	kontinuierlich	
	Temperatur	kontinuierlich	
	Leitfähigkeit	kontinuierlich	
	CSB, NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N, P <sub>ges</sub>	gem. rechtlicher Vorgabe	

Diese Parameter sind produktbezogen über Sollwerte sowie als Minima bzw. Maxima zu definieren. Unter- bzw. Überschreitungen sollten unmittelbar zur Abschaltung der betroffenen Einheit führen. Im Einzelfall können auch Analysen, z.B. von Ölen im Rohabwasser, als Parameter zur Schnellabschaltung der Abwasserzuführung integriert werden.

Die Qualität des Permeats, bestimmt anhand von Parametern wie z.B. Trübung, Konzentration von Partikeln oder hygienische Beschaffenheit, ist nach den bisherigen Erkenntnissen im Rahmen des üblichen Betriebs einer kommunalen Membranbelebungsanlage nicht zu beeinflussen.

#### 4.9.2 Automatisierter Betrieb einer Membranbelebungsanlage

Die Steuerung und Regelung der eigentlichen Filtrationsanlage basiert unabhängig von deren Installationsort, ob in der Nitrifikation oder in separaten Becken, auf den in Tabelle 4-9 aufgeführten Parametern und dient vorrangig der sichernden Überwachung.

Zudem kann und soll mit den verfügbaren Angaben aber auch ein weitgehend automatisierter Betrieb ermöglicht werden. Dieser zielt auf die Gewährleistung der geforderten Ablaufbeschaffenheit, der energetischen Optimierung und auch auf die Minimierung einzusetzender Hilfsstoffe, insbesondere derjenigen zur chemischen Reinigung ab. Für einzelne Anwendungen kann es sinnvoll oder auch erforderlich sein, die Membranbelüftung an unterschiedliche Fluxleistungen anzupassen.

Der Betrieb einer Membranbelebungsanlage besteht im Wesentlichen aus der biologischen Abwasserbehandlung und der Filtration. Grundsätzlich ist der Betrieb der Filtrationsanlage an den akuten hydraulischen Gegebenheiten zu orientieren und sollte eine möglichst geringe Querbeeinflussung mit anderen Prozessen, insbesondere der Nitrifikation, aufweisen. Die Anlage zur biologischen Abwasserreinigung ist möglichst unabhängig von der Membranfiltrationsanlage zu betreiben.

Lediglich der Sauerstoffeintrag für den CSB-Abbau oder die Nitrifikation kann durch die Belüftung der Membranen in Teilen noch unterstützt werden. Infolge des energetisch in der Regel sehr ungünstigen Eintragungssystems ist dieser Anteil aber auf ein Minimum zu begrenzen. Idealisierendes Ziel sollte es sein, dass die biologische Abwasserreinigung weitgehend abgeschlossen ist, bevor das Abwasser-Schlamm-Gemisch zu den Membranen geleitet wird.

Umfangreiche Vorgaben und Empfehlungen zur Dimensionierung und zur Konstruktion von Membranbelebungsanlagen sind im künftigen DWA-Merkblatt M 227 zu finden. Darüber hinaus sind für einen automatisierten Betrieb folgende Prinzipien zu beachten:

- Einzelne Filtrationsstraßen sind hydraulisch vollständig zu entkoppeln und mit logisch zuzuordnenden Aggregaten (u.a. Armaturen, Pumpen, Messungen) und Leitungen auszustatten. Die Anzahl der gekoppelten Filtrationselemente zu einer Straße ist entsprechend der real zufließenden Abwassermenge festzulegen.
- Zielgröße der Filtrationsleistung einer Straße bzw. Einheit ist der ggf. temperaturkompensierte zulässige Maximalfluss.
- Es ist vorteilhaft, die Membranen mit höheren Filtrationsleistungen (mindestens Bemessungsflux) zu betreiben und dadurch längere Stillstandszeiten zu ermöglichen.
- Zum Ausgleich hydraulischer Schwankungen ist eine Zwischenpufferung des Abwassers, bevorzugt in den Belebungsbecken, erforderlich.

- Funktionsfähige Filtrationsstraßen sind kontinuierlich verfügbar zu halten und über voreinstellbare Zeiten im Betrieb zyklisch zu tauschen.
- Die Luftmenge der Cross-Flow-Belüftung sollte regelbar sein, da sich die werksseitigen Vorgaben der Belüftungsintensität je nach Schlammbeschaffenheit ggf. deutlich unterschreiten lassen.
- Aufgrund des gemessenen Zuflusses in Verbindung mit den relevanten Füllständen (Belebungsbecken, Membrankammern, ggf. separates Ausgleichbecken) wird die bedarfsgerechte Zuschaltung einzelner Straßen festgelegt.
- Bei einer unüblich schnellen Änderung der Permeabilität, z.B. als Folge einer Einleitung potentieller Störstoffe, ist die entsprechende Straße außer Betrieb zu setzen, wenn dies möglich ist.
- Der Betrieb der Belebungsanlage ist so zu gestalten, dass die biologische Abwasserreinigung (CSB, Nitrifikation, P-Elimination) „vor“ der Filtration und damit weitestgehend unabhängig hiervon erfolgt.
- Der Sauerstoffeintrag und Verfahren zur Denitrifikation und Phosphorelimination können bei einer Entflechtung von Abwasserreinigung und Filtration mit üblichen Steuerungen und Regelungen einer klassischen Belebungsanlage erfolgen.
- Der Sauerstoff, der durch die Rückführung des mit Luft angereicherten Schlammes aus der Membrankammer in die biologische Stufe gelangt, wird mit einer konventionell ausgeführten Belüftungsregelung der biologischen Stufe automatisch mit berücksichtigt.
- Mit ansteigenden, hohen Zuflüssen können einzelne Filtrationsstraßen insbesondere bei Anlagen ohne nachgeschaltete Membranbecken bereits vor dem Erreichen der parametrisierten Wasserspiellagen in Betrieb genommen werden, um eine schnelle Zuschaltung weiterer Einheiten zu dämpfen.
- Mit ansteigenden Nitratwerten kann die Rezirkulation bzw. die Beschickung insbesondere bei Anlagen ohne nachgeschaltete Membranbecken anhand kontinuierlicher Nitratmessungen in der Belebung geregelt werden.
- Bei kritischen Ammoniumspitzen im Ablauf der Belebung kann mit entsprechenden Sollwertvorgaben eine Restnitrifikation in den Membrankammern erzielt werden.
- Unzulässige Druckanstiege im Permeatsystem (insbesondere Gasfreisetzung bei chemischer Reinigung) sind durch Ansteuerungen entsprechender Überdruckarmaturen und -einrichtungen zu vermeiden.

- 
- Bei Erreichen einer Mindestpermeabilität ist eine chemische Reinigung durchzuführen und die Straße ggf. außer Betrieb zu setzen.
  - Eine unbeaufsichtigte Zuführung der Reinigungskemikalien ist nicht zweckmäßig. Die Anmischung der Reinigungslösung sollte über eine anpassbare Vorgabe der Rezeptur weitestgehend ohne manuelle Eingriffe erfolgen.

Das im Rahmen dieses Projektes erstellte Simulationsprogramm berücksichtigt die meisten der hier aufgeführten technischen Vorgaben und Empfehlungen und ermöglicht den angestrebten, weitgehend automatisierten Betrieb einer Membranfiltrationsanlage.

Die Entflechtung der biologischen Abwasserreinigung und der Membranfiltration ermöglichte es, die beiden Teilprozesse auch bei der Simulation getrennt voneinander zu betrachten. Es wird dabei vorausgesetzt, dass insbesondere die Nitrifikation unabhängig von der Membranfiltration erfolgen kann. Zudem ist eine Beeinflussung der Filtration infolge Foulings durch den Feststoffgehalt, sofern sich dieser in den zulässigen Grenzen bewegt, wissenschaftlich noch nicht abschließend geklärt. Andere, den belebten Schlamm und die Filtrationsfähigkeit charakterisierende Kennwerte und Beschreibungen können bisher nicht modellhaft beschrieben werden. Eine Anpassung der IWA-Modelle [ASM\_Modelle] an die Prozesse zur Nährstoffelimination ist somit weder sinnvoll noch erforderlich.

## 5 Fazit

Im Rahmen der dreijährigen Untersuchungen konnten mit Hilfe von modellbasierten Simulationen umfangreiche Erkenntnisse für die erfolgreiche Prozessstrategie von Membrankläranlagen gewonnen werden. Damit können wesentliche Nachteile dieser Technologie, der verhältnismäßig hohe Energieverbrauch und die komplexe Verfahrenstechnik, deutlich verbessert werden. Insbesondere der Energiebedarf für die notwendige Crossflow-Belüftung getauchter Membransysteme lässt sich signifikant senken, indem die Luftmengen dem tatsächlichen Bedarf in Abhängigkeit der vorherherrschenden Belastungssituation angepasst werden.

Ein Abgleich zwischen den einzelnen Projektzielen und den gewonnen Erkenntnissen stellt sich wie folgt dar:

Ziele	Lösung/Fazit
Entwicklung einer standardisierten Datenaufnahme, -verarbeitung und -auswertung zur Absicherung und besseren Vergleichbarkeit von Betriebsdaten	Zur Absicherung und besseren Vergleichbarkeit verschiedener Membrananlagen wurde das Datenaufnahme-Tool „GECOC-DB“ entwickelt, welches verschiedenste Analyse- und Visualisierungsmöglichkeiten bietet. Durch die Möglichkeit, Messdaten im Sekundenintervall aufnehmen zu können wird sichergestellt, dass auch die kleinsten hydraulischen Effekte während der Filtration, Pause oder Relaxation berücksichtigt werden und somit ein optimaler Abgleich zwischen realen und simulierten Daten möglich ist. Durch die entwickelte Infrastruktur ist es möglich – parallel zum bestehenden Prozessleitsystem eines Anlagenbetreibers – Daten aufzunehmen und für Simulationszwecke zugänglich zu machen, ohne direkt in den Anlagenprozess einzugreifen. Mit Hilfe der entwickelten standardisierten Datenaufnahme können die Betreiber Daten ortsunabhängig auswerten, ohne den Betrieb einer Anlage zu gefährden.
Aufbau einer modellbasierten Bedienerunterstützung zur Optimierung der Betriebsstrategie von Membranbelebungsanlagen mit	Der entwickelte Simulator ist ein modellbasiertes Expertensystem und kann für Optimierungs- und Trainingszwecke eingesetzt werden. Durch die Nutzung des Modells werden dem Betriebspersonal Kenntnisse

<p>Vereinfachung der Bedienerführung</p>	<p>über die betrachtete Kläranlage zur verbesserten Bedienerunterstützung und Betriebsführung vermittelt. So können bspw. verschiedenste Betriebsstrategien verglichen und die optimale davon ausgewählt werden.</p> <p>Darauf aufbauend wurde die Benutzerschnittstelle an die Belange des Personals vor Ort angepasst und entsprechend vereinfacht. So wurde im Projekt sowohl mit Fachpersonal des Aggerverbandes als auch im Rahmen von simas-Schulungen mit Fachpublikum über die Nutzbarkeit der Bedienerführung diskutiert.</p>
<p>Entwicklung einer Web-Oberfläche zur Auswertung der Kalibrierung des Kläranlagen-simulators</p>	<p>Die Entwicklung einer Web-Oberfläche zur Auswertung der Kalibrierungsergebnisse wurde erfolgreich umgesetzt. Damit kann eine bestehende Anlage über das Internet zunächst konfiguriert werden. Danach erfolgt das Hochladen von Messdaten, die für die Kalibrierung notwendig sind. Die Ergebnisse werden an den Anlagenbetreiber zurückgesendet und können dann zur detaillierten Auswertung herangezogen werden.</p>
<p>Entwicklung einer optimalen Prozessregelung für Membran-belebungsreaktoren</p>	<p>Ziel des Projektes war es, moderne simulationsbasierte Verfahren der Prozessoptimierung und Prozessregelung zu erarbeiten, die sich in anderen industriellen Anwendungen bereits bewährt haben. Ein realitätstreues Simulationsmodell ermöglicht die Erprobung und Optimierung neuer Prozessregelungen, und dies (1) jederzeit reproduzierbar, (2) im Bruchteil der Zeit, die für die experimentelle Erprobung neuer Regelungsverfahren an der realen Anlage erforderlich ist und (3) ohne Gefährdung der Umwelt durch erhöhte Ablaufgrenzwerte, wenn die Regelungsparameter einmal ungeeignet gewählt wurden.</p> <p>Beispielhaft wurde das im Rahmen des Projektes entwickelte realitätsnahe Simulationsmodell für Membrankläranlagen zur Optimierung der Betriebsparameter des Prozessreglers der Technikumsanlage eingesetzt. Hierbei konnte der Regler mit aus der Simulation entwickelten neuen Betriebsparametern deutlich ver-</p>

	<p>bessert werden.</p> <p>Darüber hinaus wurde in zahlreichen Simulationsberechnungen das Langzeitverhalten von unterschiedlichen Membransystemen erfolgreich abgebildet. Dies umfasste neben den in Seelschied verwendeten Plattenmembranen auch Anlagen mit Hohlfasermembranen, wie sie von den Marktführern vertrieben werden. Hieraus wurden Hinweise und Regeln für die Praxis abgeleitet, mit denen die Regelungen von Membrananlagen verbessert werden können.</p> <p>Da das Simulationstool als Open Source Software entwickelt wurde, ist es für jeden potentiellen Interessenten kostenfrei über die Projekt-Homepage zugänglich. Damit kann bei entsprechender Fachkenntnis jeder Betreiber einer Membrankläranlage seine Prozessregelung mit diesem Werkzeug optimieren.</p>
<p>Nutzung des Simulationssystems zu Optimierungs- und Schulungszwecken (SIMAS)</p>	<p>Sowohl in der Planungsphase als auch im Betrieb von Membrananlagen soll eventuellen Schwachstellen und Schwierigkeiten durch ein gezieltes und effektives Training vorgebeugt werden. Aufbauend auf den Erfahrungen des Matlab-Simulationsmodell-Workshops wurde der Membrankläranlagensimulator als Schulungsinstrument sowie als flexibles und vielseitiges Werkzeug für Demonstrations- und Schulungszwecke weiterentwickelt. So kann die Software beispielsweise im Rahmen der simas- Schulung „Basismodul für das Betriebspersonal“ als Lern- und Optimierungswerkzeug eingesetzt werden.</p>
<p>Entwicklung eines umfassenden Automatisierungssystems für Membranbelebungsanlagen</p>	<p>Bei der Entwicklung der Simulationsbausteine erfolgte ein permanenter Abgleich zwischen den formulierten Ansätzen und den tatsächlichen Gegebenheiten der Demonstrationsanlage im simas. Die Ergebnisse der Simulation wurden wiederum auf den Betrieb der Demoanlage übertragen, so erfolgte insbesondere die</p>

	<p>sukzessive Reduzierung des Lufteintrages zur Deckschichtkontrolle der getauchten Membransysteme.</p> <p>Diese Ergebnisse wurden anschließend in den Fuzzy-Regler und das Betriebskonzept der KA Seelscheid implementiert und sind damit Bestandteil des Automatisierungssystems geworden.</p> <p>Das Membran-Simulationsprogramm berücksichtigt die erarbeiteten technischen Vorgaben und Empfehlungen und ermöglicht den angestrebten, weitgehend automatisierten Betrieb, der allgemein in einer Membranfiltrationsanlage angewendet werden kann.</p>
--	--

Inhaltlich lassen sich die wesentlichen Erkenntnisse und Ergebnisse wie folgt zusammenfassen:

Um dem Anspruch eines allgemeingültigen Automatisierungssystems gerecht zu werden, wurden neben der KA Seelscheid vier weitere Anlagen in die Betrachtungen mit einbezogen. Diese unterscheiden sich in Aufbau, Betriebsweise, Reinigungsstrategie und Membrantyp teilweise deutlich voneinander. Die Aufstellung der Modelle erforderte eine umfangreiche Verfahrensanalyse aller Anlagen, wodurch hydraulische und biologische Einflussgrößen identifiziert und in das allgemeine Automatisierungsmodell einfließen konnten. Alle untersuchten Anlagen sind mit dem allgemeinen Automatisierungsmodell in ausreichender Güte kalibriert und validiert worden.

Ein weiteres Ziel des Vohabens bestand darin, die Einsetzbarkeit des Modells in der Praxis zu gewährleisten. Aus diesem Grund wurden nur direkt messbare Prozessgrößen verwendet, gleichzeitig aber die Kompatibilität zu neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen offen gehalten.

Grundlage für den Modellaufbau war das „Widerstandsmodell in Reihe“. Als Eingangsgrößen wurden die Standard-Betriebsparameter Trockensubstanzgehalt, Temperatur und Permeatflux verwendet. Dies gewährt gleichzeitig eine Kompatibilität zu standardisierten Simulationsmodellen wie dem Activated Sludge Model (ASM) der International Water Association (IWA).

Insbesondere die folgenden Aufgaben wurden erfolgreich umgesetzt:

- Identifizierung der Prozessabläufe einer Membrankläranlage durch Installation der Messtechnik und deren Aufzeichnung sowie nachfolgende Analyse der Messwerte

- Allgemeine mathematische Formulierung der ermittelten Zusammenhänge zwischen den Prozessgrößen
- Umsetzung der mathematischen Formulierung in ein Simulationsmodell
- Kalibrierung der Parameter des Simulationsmodells für unterschiedliche Membrananlagen
- Validierung des Simulationsmodells für unterschiedliche Membrananlagen
- Diskretisierung des Simulationsmodells für die Entwicklung des Schulungssimulators

Anhand der guten Kalibrierungs- und Validierungsergebnisse auf Basis von sieben typischen Onlinemessgrößen einer Membrankläranlage konnte festgestellt werden, dass das Modell die Eigenschaften verschiedener Membran- und Anlagentypen erfolgreich beschreiben kann. So konnten dynamische Effekte – wie sie z.B. bei hydraulischen Lastwechseln auftreten – erfolgreich abgebildet werden. Auch die Versuche an der simas-Anlage konnten mit unterschiedlichen Betriebsfahrweisen über sechs Monate gut modelliert werden.

Am Beispiel der KA Monheim wurde versucht, mit Tagesmittelwerten eine Vorhersage über die qualitative Entwicklung des Transmembrandrucks zu erreichen, ohne kurzzeitige Filtrationseffekte zu berücksichtigen. Dabei ist es gelungen, das Langzeitverhalten dieser Anlage durch manuelle Anpassung der Modellparameter auf Basis des Modells der KA Nordkanal erfolgreich widerzuspiegeln.

Des Weiteren wurde nachgewiesen, dass das Modell außergewöhnliche Anlagenzustände automatisch erkennen kann. Dies hat nicht nur den Vorteil, dass größere Reparaturmaßnahmen früher erkannt werden können, sondern auch, dass die einzelnen Straßen durch die berechnete Membranqualität bewertet und somit nach Zuständen kategorisiert werden können. Damit können z.B. Wartungsintervalle zustandsorientiert festgelegt werden und müssen nicht mehr – wie bisher – nach festem Zeitraster erfolgen.

Aufgrund von hydraulischen Belastungsschwankungen kann für Membrananlagen kein optimaler Betrieb erreicht werden, wenn ein fest eingestelltes Zykluszeitenverhältnis von Relaxations/Filtrations/Pausen-Zeiten vorgegeben wird. Deshalb ist es empfehlenswert, die Zykluszeiten (oder die Belüftungsintensität) den zu erwartenden Belastungen anzupassen, um somit den Filtrationsprozess zu jeder Zeit möglichst belastungsangepasst zu betreiben.

Eine Regelung dieser Zeitverhältnisse wäre grundsätzlich mit einem vorausschauenden modellbasierten Prozessregler möglich, der als nicht-lineares Mehr-Parameter-System aufgebaut ist. Entsprechende Vorarbeiten und Machbarkeitsuntersuchungen sind im Rahmen des Projektes durchgeführt worden. In den umfangreichen Simulationsberechnungen konnte das Langzeitverhalten der Membransysteme erfolgreich simuliert

werden, so dass hieraus Hinweise und Regeln für die Praxis ableitbar sind, die eine modellbasierte Online-Regelung im ersten Ansatz ersetzen könnten.

Allerdings sollte die Weiterentwicklung des Themas nicht aus den Augen verloren werden: Eine in Echtzeit betriebene adaptive Prozessoptimierung (Online-Simulation) würde ein interessantes und für die betriebliche Praxis wichtiges Forschungsthema für Folgeprojekte darstellen. Neueste Grafikkartenprozessoren (GPU) ermöglichen über sogenannte GPU-Cluster erstmals parallele Echtzeitberechnungen ohne kostenintensives Rechenzentrum-Equipment. Alternativ könnte in einem Folgeprojekt untersucht werden, ob die Simulation als innovative Cloud-Anwendung in Echtzeit betrieben werden kann, wodurch mehrere Anlagenbetreiber zusammen Kosten senken und das Know-How miteinander teilen können.

Die verglichen mit klassischen Kläranlagen deutlich komplexere Technik von Membrankläranlagen erschwert das Eingreifen in laufende Prozesse, da nicht nur die aktuellen Auswirkungen, sondern auch die mittelfristigen Effekte berücksichtigt werden müssen. Daher ist es wichtig, dem Personal vor Ort dieses breite Wissensgebiet möglichst umfassend und anschaulich zu vermitteln. Aufbauend auf den Erfahrungen von Anlagenbetreibern, Ingenieurbüros und Hochschulen wurde erfolgreich ein Membrankläranlagensimulator entwickelt, der als Schulungsinstrument sowie als flexibles Simulationstool einsetzbar ist und gleichzeitig zur modellbasierten Bedienerunterstützung verwendet werden kann. Mit dem internet-basierten Simulator können Membranstufen für Membrankläranlagen aufgebaut und parametrisiert werden. So können beispielsweise reale Messdaten zur Berücksichtigung von lokalen spezifischen Randbedingungen der Anlagen zur Modellkalibrierung hochgeladen werden.

Um einen möglichst breiten Bekanntheitsgrad zu erreichen, sollen Zugang und Download der aktuellen Version des Membrankläranlagensimulators mit Handbuch sowie der Forschungsbericht über die Internetseiten der BR Köln, des MKULNV und der Projektpartner zur Web-Oberfläche „[membran.gecoc-projects.de](http://membran.gecoc-projects.de)“ der FH Köln verlinkt werden. Die entwickelte Web-Plattform kann so als Online-Anlaufstelle für Projekt-, Simulations- und Membran-Interessierte dienen, die entwickelten Tools sind damit als Analyse-, Schulungs- und Optimierungsinstrumente vielseitig einsetzbar.

Neben dem Aufbau und der Entwicklung eines allgemein nutzbaren Automatisierungssystems für Membranbelebungsanlagen erfolgten zur praktischen Erprobung und Absicherung der Modellansätze ergänzende Untersuchungen, u. a. zur Reduzierung der CF-Luftmenge und zum Einfluss des permeatseitigen Rohrleitungssystem auf die Permeabilitätsermittlung.

Die Untersuchungen zur Reduzierung der CF-Luftmenge erfolgten an der Kubota Membran-schulungs-anlage „simas“ des Aggerverbandes. Diese Untersuchungen fanden

im Rahmen des Ergänzungsantrages statt. Es zeigte sich, dass sich eine Reduzierung der Luftmenge von 0,75 bis 0,53  $\text{m}^3_{\text{N}}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$  (Hersteller-Angabe) auf 0,19  $\text{m}^3_{\text{N}}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$  nicht nachteilig auf das Betriebsverhalten der Membrananlage auswirkte. Da diese orientierenden Untersuchungen zeitlich begrenzt und nur auf einen Membrantyp bezogen waren, kann das allgemeine Umsetzungspotenzial nur durch längere Untersuchungszeiträume und weitere Erfahrungen von großtechnischen Anlagen sicher verifiziert werden. Für die Kläranlage Seelscheid wurde, motiviert durch das vielversprechende Simulationsergebnis, der CF-Luftvolumenstrom schrittweise auf aktuell 0,34  $\text{m}^3_{\text{N}}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$  gesenkt, was einer spezifischen Energiereduzierung von rund 0,35 kWh/ $\text{m}^3$  Abwasser entspricht. Eine weitere Reduzierung erscheint hier möglich und wird angestrebt.

Der Vergleich der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Membranbelebungsanlagen erfolgt in der Regel anhand der Leistungskenngröße Permeabilität. Bisher erfolgte die Permeabilitätsermittlung durch die Division des flächenspezifischen Flusses durch die erforderliche Triebkraft, gemessen als transmembrane Druckdifferenz. Fehlende systematische Untersuchungen über den Einfluss des Installationsortes des Drucksensors machen einen direkten und belastbaren Vergleich von Anlagen untereinander unmöglich. Im Rahmen des Vorhabens wurde der Einfluss des permeatseitigen Rohrleitungssystems auf die Ermittlung der transmembranen Druckdifferenz und somit auf die Permeabilität untersucht. Die Untersuchungen zeigten, dass die unterschiedlichen dynamischen Rohrleitungsverluste im Permeatsammelsystem i.d.R. nicht zu vernachlässigen sind. Diese sollten daher berücksichtigt werden, wenn Vergleiche mit anderen Anlagen oder anderen Einheiten angestrebt werden.

## Literaturverzeichnis

- BAUMGRATEN, S. (2007): Membranbioreaktoren zur industriellen Abwasserreinigung. Dissertation RWTH Aachen. Im Internet unter: [http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2008/2394/pdf/Baumgarten\\_Sven.pdf](http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2008/2394/pdf/Baumgarten_Sven.pdf) (01.07.2011).
- BLANCHETTE, J. UND SUMMERFIELD, M. (2008): C++ GUI Programming with Qt 4 - The Only Official, Best-Practice Guide to Qt 4.3 Programming, Prentice Hall, 2<sup>nd</sup> edition.
- BOERLAGE S.F., KENNEDY M.D., ANIYE M.P ET AL. (1998): Monitoring particulate fouling in membrane systems. *Desalination*, 118, pp. 131-142.
- BOUHABILA E.H., BEN AIM R., BUISSON H. (2001): Fouling characterisation in membrane bioreactors. *Separation and Purification Technology* 22-23, pp. 123-132.
- CHANG, I. S., LE CLECH, P., JEFFERSON, B., JUDD, S. (2002): Membrane fouling in membrane bioreactors for wastewater treatment. *Journal of Environmental Engineering-Asce* 128 (11), 1018-1029.
- CRITTENDEN, J. C., TRUSSELL, R. R., HAND, D. W., HOWE, K. J., TCHOBANOGLIOUS, G. (2005): *Water Treatment: Principles and Design*. 2. Auflage, MWH, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ (USA).
- DREWS, A.; MANTE, J.; IVERSEN, V.; VOCKS, M.; LESJEAN, B.; KRAUME, M. (2007): Impact of ambient conditions on SMP elimination and rejection in MBRs, *Water Research* 41, 3850-3858.
- FANE A.G. (1986): Ultrafiltration: Factors influencing flux and rejections. In: *Progress in Filtration and Separation* 4, pp. 101-179, Amsterdam.
- GASPER H. (1990): *Handbuch der industriellen Fest/Flüssig-Filtration*. Heidelberg.
- GNU (1991) GPL: General Public License - Version 2. Available from: <http://www.gnu.org/licenses/gpl-2.0.html> (accessed 5 January 2011).
- GNU (1999) LGPL: Lesser General Public License - Version 2.1. Available from: <http://www.gnu.org/licenses/lgpl-2.1.html> (accessed 10 January 2011).
- HENZE, M.; GUJER, W.; MINO, T.; VAN LOOSEDRECHT, L. (2000): Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. IWA Scientific and technical report no. 9. London.
- HERMIA, J. (1982): Constant pressure blocking filtration laws - application to power-law non-Newtonian fluids. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers* 60 (3), 183-187.
- HO, C. C., ZYDNEY, A. L. (2000): A combined pore blockage and cake filtration model for protein fouling during microfiltration. *Journal of Colloid and Interface Science* 232 (2), 389-399.

- HUANG, H., YOUNG, T. A., JACANGELO, J. G. (2008): Unified membrane fouling index for low pressure membrane filtration of natural waters: Principles and methodology. *Environmental Science & Technology* 42 (3), 714-720.
- JOSS, A.; BÖHLER, M.; WEDI, D.; SIEGRIST, H. (2008): Proposing a method for online permeability in membrane bioreactors, Conference Design and operation of membrane plants for water, wastewater, industrial water, 1-2 Oktober 2008 Amsterdam, Niederlande.
- LAUBACH, J. (2001): Vergleich verschiedener Membransysteme zur Biomasseabtrennung, RWTH Aachen. Aachen.
- LE-CLECH, P.; CHEN, V.; FANE, T. A. G. (2006): Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. In: *Journal of membrane science* 284 1-2, S. 17–53.
- LIM, A. L. (2003): Membrane fouling and cleaning in microfiltration of activated sludge wastewater. In: *Journal of membrane science* 216 1-2, S. 279–290.
- LUDWIG, T.; GAIDA, D.; KERN, P.; KEYSERS, C.; BONGARDS, M. (2010): Development of a Simulation Model for hollow-fiber and flat sheet membrane wastewater treatment Plants. In: *Crossing borders within the ABC: Automation, biomedical engineering and computer science*, P. Scharff (ed.), ISLE Verlag, Ilmenau, Germany, S. 51–56.
- LUDWIG, T.; GAIDA, D.; KEYSERS, C.; BONGARDS, M.; BALJAN, M. (2011a): EnAM membrane wastewater treatment simulator: Simulate your filtration process. Available from: <http://membran.gecoc-projects.de> (accessed 12 June 2011).
- LUDWIG, T., KERN, P., BONGARDS, M., WOLF, C. (2011b). Simulation and optimization of an experimental membrane wastewater treatment plant using computational intelligence methods. *Water Science & Technology* 63(10), S. 2255–2260.
- MATHWORKS 2011 MATLAB: Matlab and Simulink for Technical Computing. Available from: <http://www.mathworks.com> (accessed 20 January 2011).
- MCCARTHY A.A., WLASH P.K., FOLEY G. (2002): Experimental techniques for quantifying the cake mass, the cake and membrane resistances during crossflow filtration of microbial suspensions. *Journal of Membrane Science* 201, pp. 31-45, Amsterdam.
- MELIN T., RAUTENBACH R. (2003): Membranverfahren. Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung. Springer-Verlag, Berlin.
- MULDER M. (1996): Basic principles of membrane technology. 2nd edition, AA Dordrecht.
- MUNLV (2007): Strategien zur Foulingkontrolle bei Membranbelebungsanlagen in der kommunalen Abwasserbehandlung Abschlussbericht, Düsseldorf.

- NAGAOKA H., UEDA S., MIYA A. (1996): Influence of bacterial extracellular polymers on the membrane separation activated sludge processes. In: *Water Science and Technology* 34, pp. 165-172.
- NAGAOKA, H.; AKOH, H. (2008): Decomposition of EPS on the membrane surface and its influence on the fouling mechanism in MBRs. In: *Desalination* 231, S. 150–155.
- NOKIA (2011): Qt Cross-platform application and UI framework. Available from: <http://qt.nokia.com> (accessed 10 January 2011).
- PALACIO, L., HO, C. C., ZYDNEY, A. L. (2002): Application of a pore-blockage - cakefiltration model to protein fouling during microfiltration. *Biotechnology and Bioengineering* 79 (3), 260-270.
- PINNEKAMP, J., FRIEDRICH H. (2003): *Abwasserreinigung mit Membrantechnik*. Hrsg.: Ministerium für Umwelt, Natur, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, FiW-Verlag, Aachen.
- PINNEKAMP, J.; GRINWIS, S.; KEYSERS, C.; CRAMER, C.; MONTAG, D.; HERBST, H.; BREPOLS, C.; SCHÄFER, H.; BRANDS, E.; ROLFS, T.; V. BENTEM, A.; V. D. ROEST, H.; VOBENKAUL, K.; VOLMERING, D.; LOCH, D. (2008): *Weitergehende Reinigung in kommunalen Kläranlagen mittels MBR-Technologie, Abschlussbericht*, Hrsg. MUNLV, Düsseldorf.
- ROSENBERGER, S. (2003): *Charakterisierung von belebtem Schlamm in Membranbelebungsreaktoren zur Abwasserreinigung*. Fortschritt-Berichte VDI, 769, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf.
- ROSENBERGER, S.; LAABS, C.; LESJEAN, B.; GNIRSS, R.; AMY, G.; JEKEL, M.; SCHROTTER, J.-C. (2006): Impact of colloidal and soluble organic material on membrane performance in membrane bioreactors for municipal wastewater treatment, *Water Research* 40, 710-720.
- STEPHENSON T., JUDD S., JEFFERSON B., BRINDLE K. (2000): *Membrane bioreactor for wastewater treatment*. IWA Publishing, London.
- TANIGUCHI, M., KILDUFF, J. E., BELFORT, G. (2003): Modes of natural organic matter fouling during ultrafiltration. *Environmental Science & Technology* 37 (8), 1676-1683.
- TRUSSELL, R. S., ADHAM, S., TRUSSELL, R. R. (2005): Process limits of municipal wastewater with submerged membrane bioreactor, *J. Env. Eng. ASCE*, 131(3): 410-416.
- UHLENHUT, F. (2004): *Neuer Modellansatz (FUKA) zur Beschreibung der biologischen Abbauvorgänge in Kläranlagen: Forschung und wissenschaftliches Rechnen - Heinz-Billing-Preis*, S. 137–154.

- 
- WANG, Z.; WU, Z.; TANG, S. (2009): Extracellular polymeric substances (EPS) properties and their effects on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor. In: *Water Research* 43, S. 2504–2512.
- WEDI, D; WILD, W; SCHADE, M.; BLEISTEINER, S. (2007): Vierjähriger Betrieb der Membranbel-  
ebungsanlage Monheim, Abwasserreinigung, Leistungsänderungen, mögliche Ursachen, 7.  
Aachener Tagung Wasser und Membranen, Aachen.
- WETT, M. (2005): Foulingverhalten des Membranbelevungsverfahrens und Auswirkungen auf  
die Leistungsfähigkeit. Dissertation am Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft der  
Universität Kassel.
- WINTGENS, T. (2005): Modellierung von Membranbioreaktoren für die Abwasserbehandlung  
unter Berücksichtigung endokrin wirksamer Substanzen. Dissertation RWTH Aachen,  
Verlagshaus Mainz GmbH, Aachen.
- YE, Y., LE CLECH, P., CHEN, V., FANE, A. G., JEFFERSON, B. (2005): Fouling mechanisms of  
alginate solutions as model extracellular polymeric substances. *Desalination* 175 (1), 7-  
20.
- YUAN, W., KOCIC, A., ZYDNEY, A. L. (2002): Analysis of humic acid fouling during  
microfiltration using a pore blockage-cake filtration model. *Journal of Membrane Science*  
198 (1), 51-62.

# Anhang

