

Kurzbericht

„Entwicklung eines allgemein nutzbaren Automatisierungssystems für Membranbelebungsanlagen“

(EnAM)

gerichtet an das



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

Antragssteller

	<p>Der Aggerverband Sonnenstr. 40 51645 Gummersbach</p>	<p>Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing M. Weber D. Leiße</p>
---	---	--

Projektpartner

	<p>FH Köln – Campus Gummersbach Institut für Automation & Industrial IT Prof. Dr-Ing. M. Bongards</p>	<p>Dipl.-Ing. (FH) T. Ludwig, M.Eng. D. Gaida, M.Sc.</p>
	<p>FH Köln Institut für Anlagen- und Verfahrenstechnik Prof. Dr. G. Braun</p>	<p>Prof. Dr. G. Braun</p>
	<p>RWTH Aachen Institut für Siedlungswasserwirtschaft Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp</p>	<p>Dipl. Ing. C. Keyzers</p>
	<p>Ing.-Büro ATM Dipl.-Ing. Detlef Wedi Friedrich-Seele-Straße 1b 38122 Braunschweig</p>	<p>Dipl.-Ing. D. Wedi</p>
	<p>Ingenieurbüro Klapp und Müller GmbH Büro Reichshof Rehwinkel 15 51580 Reichshof</p>	<p>Dr.-Ing., Dipl.-Wirt.Ing. S. Schilling</p>

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Zielsetzung	1
2	Beschreibungen, Untersuchungen und Ergebnisse der betrachteten Anlagen zur Modellentwicklung.....	2
2.1	KA Seelscheid.....	2
2.1.1	Analyse der hydraulischen Bedingungen (permeatseitiges Rohrleitungssystem)	3
2.1.2	Prozessregelung und -führung	6
2.2	Halbtechnische simas-Versuchsanlage	9
3	Ergebnisse	13
3.1	Mathematische Grundlagen und Aufbau des Simulationsmodells	13
3.2	Modellumgebung und -entwicklung	16
3.3	Modellkalibrierung und -validierung	19
3.4	Aufbau einer modellbasierten Bedienerunterstützung und des Schulungssimulators ..	23
3.5	Optimierung der Prozessregelung	25
4	Fazit.....	27

Verzeichnis der Bilder

Bild 2-1:	Fließschema der KA Seelscheid	2
Bild 2-2:	Membrankammern mit permeatseitigem Rohrleitungssystem der KA Scheelscheid.....	3
Bild 2-3:	Entwicklung des Druckverlusts über die jeweiligen Membranabschnitte.....	4
Bild 2-4:	Korrektur des Unterdruckes.....	5
Bild 2-5:	Betriebsdiagramm für die Membranstraße MB 1 OL bei Vollastbetrieb.....	6
Bild 2-6:	Spezifischer Energieverbrauch in den sechs Betriebsphasen, mit Mittelwert und mittlerer Abweichung als Maß für die Streuung der Daten.....	9
Bild 2-7:	Variation des Luftvolumenstroms (Cross-Flow Belüftung) bei einem Filtratabzug nach Ganglinie (mittlere Flächenbelastung $6 \text{ l/m}^2 \text{ h}$) des Versuchsabschnitts 3	11
Bild 2-8:	Verblockte Membranplatten - Zwischenräume komplett mit Biomasse zugesetzt.....	12

Bild 3-1:	Allgemeines Simulationsmodell der Membranstufe im Detail.....	17
Bild 3-2:	Aufbau des Simulationsmodells der Membrankläranlage Seelscheid (Biologie und Membranstraßen)	18
Bild 3-3:	Kalibrierung der Straße 1, Element oben links am 02.04.2010	20
Bild 3-4:	Validierung Straße 3, Element rechts oben am 26.04.2010.....	21
Bild 3-5:	Benutzeroberfläche des Membrankläranlagen-Simulators	24
Bild 3-6:	Zielfunktion der Optimierungsprobleme	26

1 Veranlassung und Zielsetzung

Mit den ersten Erfahrungen im großtechnischen Betrieb der Membrankläranlage Seelscheid 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.

Das Hauptaugenmerk des Forschungsprojekts „Entwicklung eines allgemein nutzbaren Automatisierungssystems für Membranbelebungsanlagen (EnAM)“ lag auf der Entwicklung einer Simulationssoftware und eines Simulators, die als zielführende Instrumente sowohl für Optimierungs- als auch für Trainingszwecke dienen sollen. Die wesentlichen Untersuchungsaspekte sind:

- Entwicklung einer standardisierten Datenaufnahme, -verarbeitung und -auswertung zur Absicherung und besseren Vergleichbarkeit von Betriebsdaten
- Entwicklung eines mathematischen Modells zur Beschreibung und Optimierung von Membrankläranlagen
- Aufbau einer modellbasierten Bedienerunterstützung zur Optimierung der Betriebsstrategie (Simulator) mit Vereinfachung der Bedienerführung
- Entwicklung einer Web-Oberfläche zur Auswertung der Kalibrierung des Kläranlagen-simulators
- Entwicklung einer optimalen Prozessregelung für Membranbelebungsreaktoren
- Nutzung des Simulationssystems zu Optimierungs- und Schulungszwecken
- Entwicklung eines umfassenden Automatisierungssystems für Membranbelebungsanlagen

2 Beschreibungen, Untersuchungen und Ergebnisse der betrachteten Anlagen zur Modellentwicklung

Im Rahmen des Projektes wurden fünf kommunale Membranbelebungsanlagen in unterschiedlicher Weise und Intensität betrachtet. Es wurden sowohl bereits vorliegende Ergebnisse genutzt, als auch gezielt projektspezifische Untersuchungen durchgeführt und/oder Modellansätze überprüft. Im Rahmen des Kurzberichts werden lediglich die Membranbelebungsanlage Seelscheid und die simas-Anlage näher vorgestellt.

2.1 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 2-1 dargestellt.

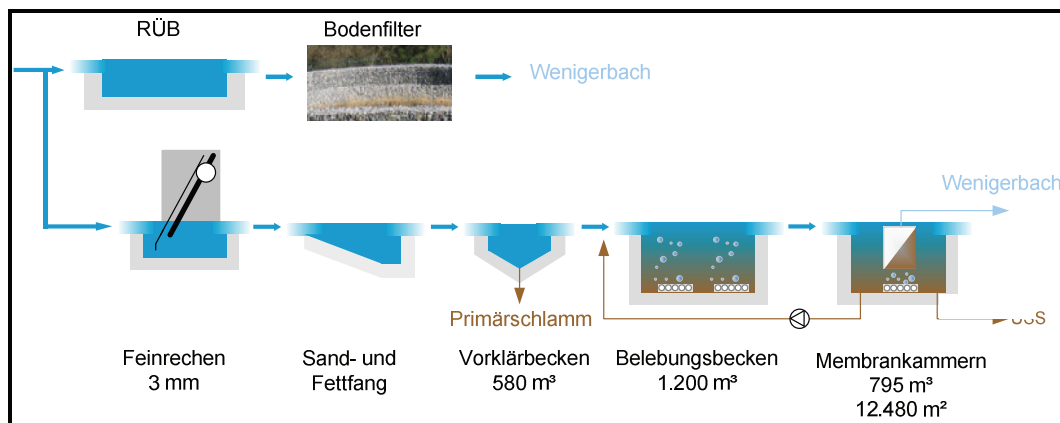


Bild 2-1: Fließschema der KA Seelscheid

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 m³ werden im freien Gefälle beschickt, die zulaufende Wassermenge wird immer gleichmäßig verteilt. In jeder Membranstraße befinden sich 13 Doppelstockmodule der Firma Kubota, Typ EK400 (Gesamtmembranfläche 12.480 m²), die wiederum in zwei Halbstraßen mit sechs bzw. sieben Modulen aufgeteilt sind (Bild 2-2). Die obere und untere Ebene einer Membranstraße verfügt jeweils über eine separate Mengenmessung. Für jede Ebene beider Halbstraßen ist je eine Druckmessung installiert.

Unter Berücksichtigung der Herstellerangabe für den flächenspezifischen Luftbedarf in Höhe von 0,52 m³_N/(m²·h) ergibt sich eine notwendige Gesamtluftmenge für die grobblasige Cross-Flow-Belüftung von 8.017 m³_N/h. Installiert sind sechs Drehkolbengebläse mit je ca. 1.400 m³_N/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.

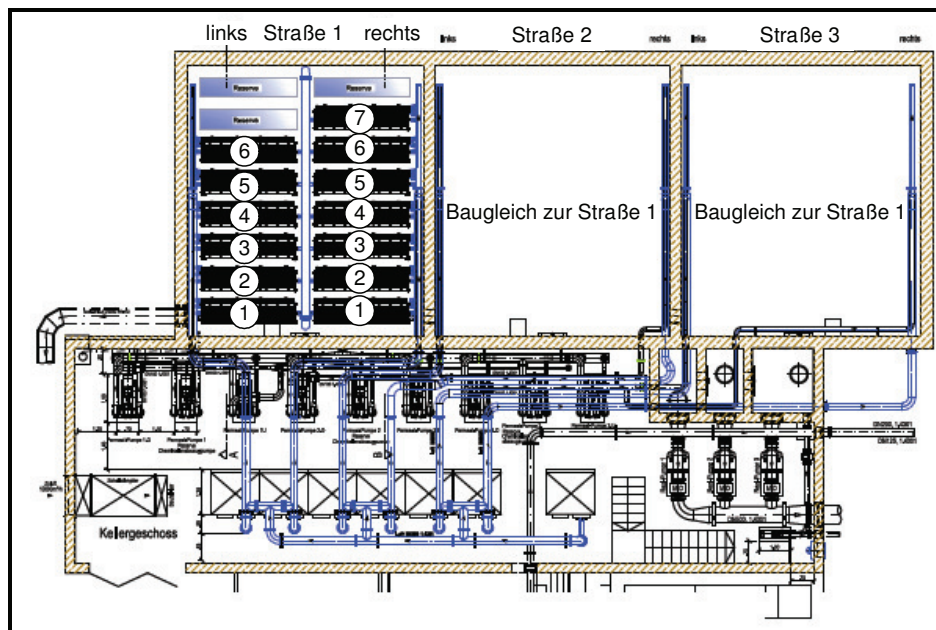


Bild 2-2: Membrankammern mit permeatseitigem Rohrleitungssystem der KA Scheelscheid

2.1.1 Analyse der hydraulischen Bedingungen (permeatseitiges Rohrleitungssystem)

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, an denen die Permeatverrohrung aus den Membranbecken heraustritt. Der an dieser Stelle erfasste Druck entspricht nicht der tatsächlichen transmembranen Druckdifferenz (TMP), sondern beinhaltet noch die Verluste zwischen den Membranplatten und der Messstelle. Diese bisher unbekanntenen Verluste wurden experimentell bestimmt.

Es zeigte sich, dass der Druckverlust im Permeatsammelrohr eines Membranmoduls vernachlässigbar klein ist, und somit an jedem Membranelement praktisch der gleiche Unterdruck herrscht. Innerhalb der Membraneinheiten (siehe Bild 2-2) einer Straße steigt der Druckverlust von der Anschlussstelle zum Ende hin stetig an (Bild 2-3), wodurch die transmembrane Druckdifferenz abnimmt.

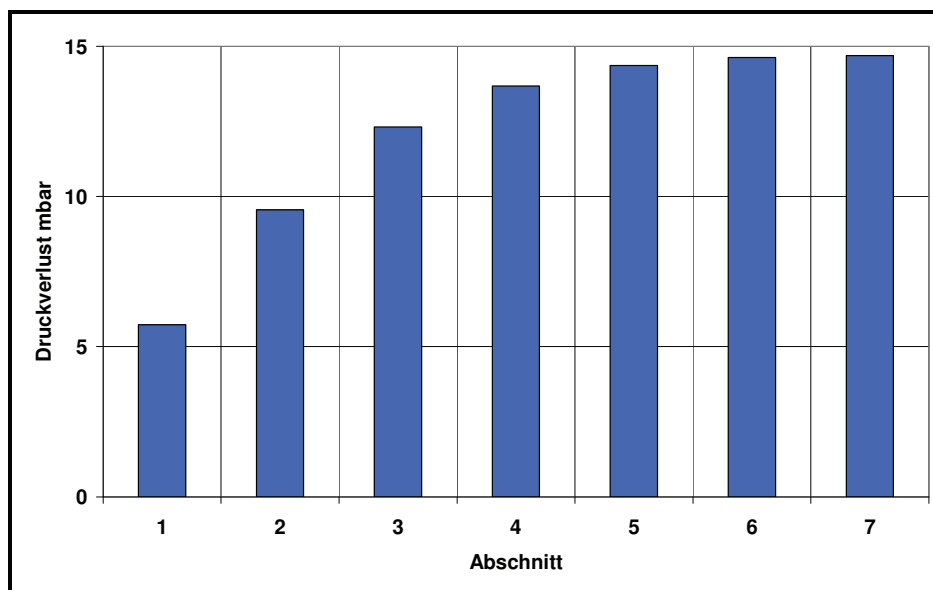


Bild 2-3: Entwicklung des Druckverlusts über die jeweiligen Membranabschnitte

Für die Korrektur der gemessenen Unterdrücke zur Berechnung der Permeabilitäten wird, der Druckverlust für den mittleren Abschnitt verwendet (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 2-4 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.

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.

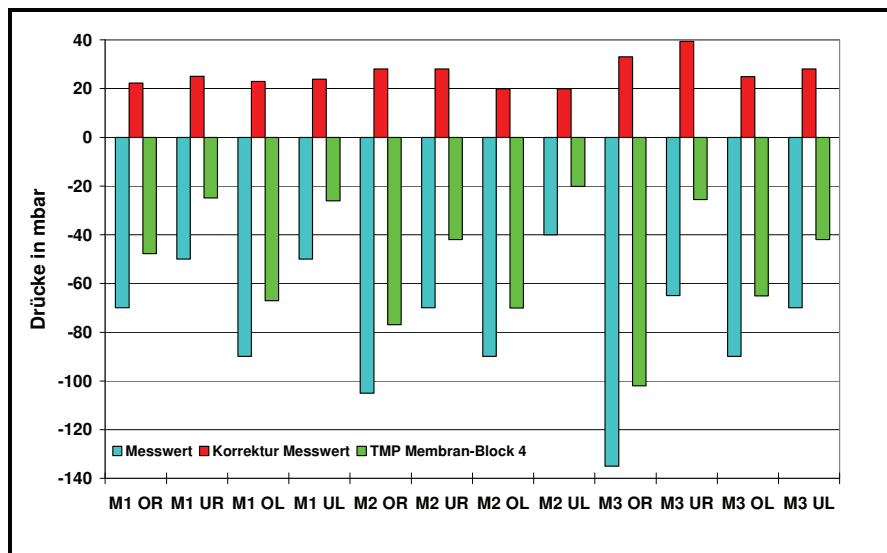


Bild 2-4: Korrektur des Unterdruckes

Gravity-Flow-Betrieb 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 aus der Wasserspiegeldifferenz zwischen Membranbecken und Auslauf. Beim Gravity-Flow-Betrieb zeigte sich ein Unterschied zwischen Teillast- und Vollastbetrieb.

Beispielhaft wurden die Messdaten aus der Anlage Seelscheid für den Vollastbetrieb vom 23.02.2010 für die Auswertung verwendet. Bild 2-5 zeigt für die Membranstraße MB 1 OL das Betriebsdiagramm bei Vollastbetrieb. 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 2-5)

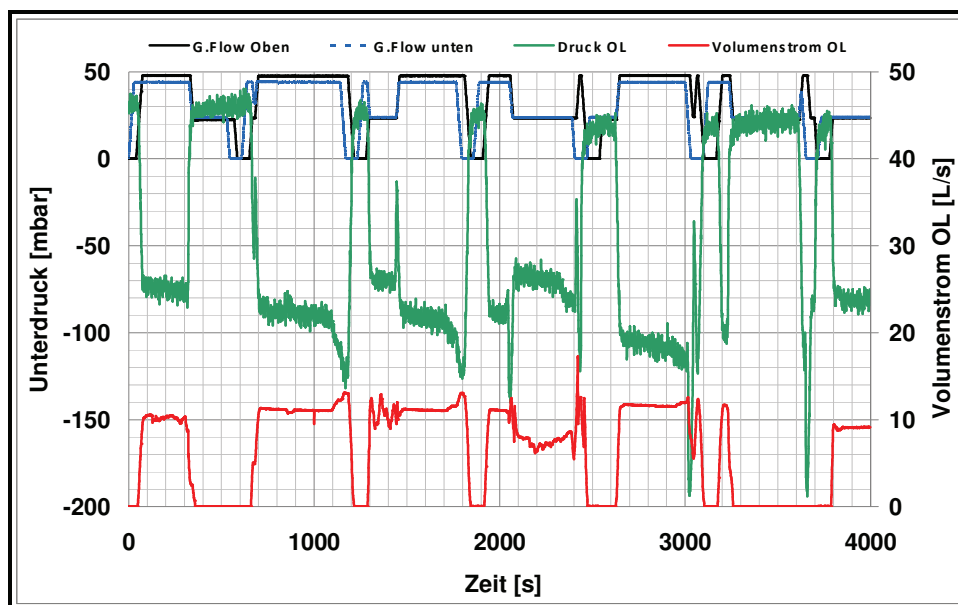


Bild 2-5: Betriebsdiagramm für die Membranstraße MB 1 OL bei Vollastbetrieb

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.

2.1.2 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

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 der 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.

Biologischer Fuzzy-Regler

Bedingt durch die Cross-Flow-Belüftung kommt es in den Membranbecken zu einem nutzbaren 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
- O_2 -Gehalt in den Membranbecken (je eine Messung pro Straße)

Ein hoher $\text{NH}_4\text{-N}$ - sowie ein geringer O_2 - 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 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. $0,34 \text{ m}^3_{\text{N}}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.

Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs

Insgesamt werden auf der Membranbelebungsanlage Seelscheid 64 verschiedene Energieverbraucher detailliert erfasst und vergleichend bewertet. In der Summe verringerte sich der spezifische Energiebedarf, berechnet als kWh/m³ zufließendes Abwasser, gem. Bild 2-6 von 1,7 (Phase I) auf nur 0,73 kWh/m³ (Phase 7). Weiterhin ist festzustellen, dass die Schwankungen im spezifischen Energieverbrauch als Folge der Optimierungsmaßnahmen deutlich kleiner geworden sind.

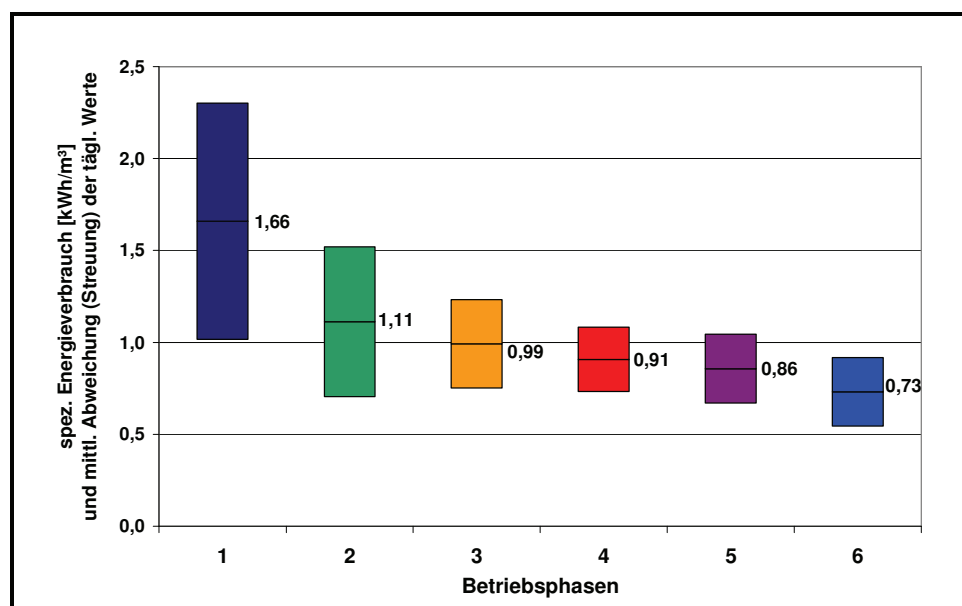


Bild 2-6: Spezifischer Energieverbrauch in den sechs Betriebsphasen, mit Mittelwert und mittlerer Abweichung als Maß für die Streuung der Daten

2.2 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 Aggverband vorgenommen. 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.

Dauerbetrieb mit Bemessungsflux und Variation des CF-Luftvolumenstromes

Im Rahmen des ersten Versuchsabschnittes wurde der Luftvolumenstrom zur Cross-Flow Belüftung in einem Bereich von 150 m³_N/h (0,446 m³_N/(m²·h)) bis 240 m³_N/h (0,750 m³_N/(m²·h)) (bei konstantem Filtratabzug von 27 l/(m²·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 beobachtet worden, 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.

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 führte 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. Als Ergebnis konnte der Betrieb für einen spezifischen Fluss von $13 \text{ l}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ und einem Luftvolumenstrom von $150 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$ nur über drei bis vier Wochen (Mitte März bis Mitte April 2010 und Juni 2010) sichergestellt werden. Es ist davon auszugehen, dass die vorgenommene Luftvolumenstromreduzierung bei dieser Flächenbelastung keine ausreichenden Scherkräfte zur Deckschichtkontrolle erzeugt.

Dauerbetrieb mit gangliniengesteuerten Flux und Variation des Luftvolumenstroms

Großtechnische Membranbelebungsanlagen werden i.d.R. mit einer über das Jahr mittleren Flächenbelastung von $5\text{-}10 \text{ l}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ betrieben (KA Seelschied: $6 \text{ l}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$). 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.

Darauf hin wurde eine repräsentative Gangliniensteuerung proportional zur KA Seelscheid 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.

Aus den Versuchen (Phase A) mit einer Erhöhung des Flusses auf ca. 35 l/(m²·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. Die in Bild 2-7 dargestellten Permeabilitäten wurden nicht temperaturkompensiert.

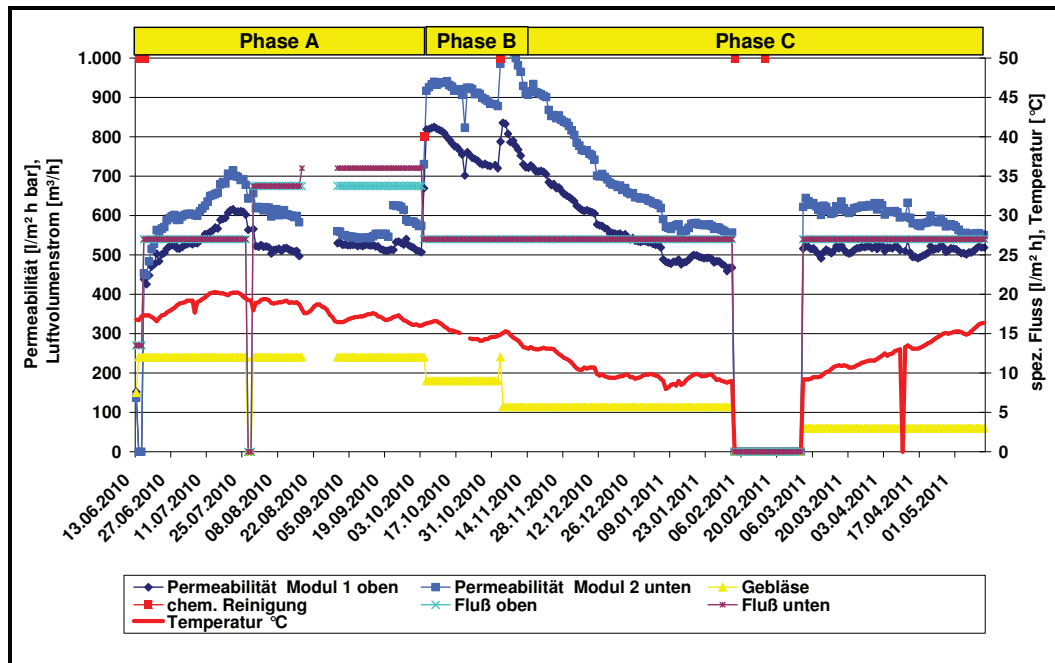


Bild 2-7: Variation des Luftvolumenstroms (Cross-Flow Belüftung) bei einem Filtratabzug nach Ganglinie (mittlere Flächenbelastung 6 l/m² h) des Versuchsabschnitts 3

Nach der Reduzierung des Flux (Phase B) von 35 bzw. 37 l/(m²·h) auf 27 l/(m²·h) liegt das Permeabilitätsniveau in einem Bereich von 800 bis 900 l/(m²·bar·h) über einen Zeitraum von etwa vier Wochen (Anfang Oktober bis Anfang November) (Bild 2-7). Diesen Versuchen liegt ein Cross-Flow Volumenstrom von 180 m³_N/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 m³_N/h reduziert. Bild 2-7 zeigt den „positiven Permeabilitätsverlauf“ in diesem Versuchsabschnitt. Der sehr günstige Permeabilitätsverlauf des Membranmoduls über knapp drei Monate mit einer Stabilisierung der Permeabilität bei 500-600 l/(m²·bar·h), mit einer dem Temperaturverlauf folgenden leichten Steigerung, lässt das Potenzial auf eine groß-

technische 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 2-7)

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 $0,12 \text{ kWh}/\text{m}^3$:

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 Abschaltendrucks 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. Bild 2-8 zeigt eine Aufnahme der verblockten Platten, infolge eines Permeatabzugs ohne Cross-Flow-Belüftung.



Bild 2-8: Verblockte Membranplatten - Zwischenräume komplett mit Biomasse zugesetzt

3 Ergebnisse

3.1 Mathematische Grundlagen und Aufbau des Simulationsmodells

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]
 Δp : Druckdifferenz [N/m²]
 μ : dynamische Viskosität [N·s/(m²)]
 R_{Ges} : ges. Strömungswiderstand [1/m]

Gleichung 1

Somit gilt:

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

R_i : strömungswirksame Widerstände Gleichung 2

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 Widerstandmodells 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 3

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.

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

δ : Membrandicke [m]

ε : Membranporosität [-]

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

Gleichung 4

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:

$$R_{DS}(t) = r_{DS} \cdot m_p(t) = r_{DS} \int_0^t F(\tau) \cdot X_{TSS}(\tau) - k_r \cdot Q_{CF}(\tau) \cdot X_{TSS}(\tau) - k_p(\tau) d\tau \quad \text{Gleichung 5}$$

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

$m_p(t)$: 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 Permeatflux 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 ϕ_c = mittlerer Effizienzgrad der chemischen Reinigung

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.

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

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

3.2 Modellumgebung und -entwicklung

Das allgemeine Simulationsmodell für Membranstufen von Membrankläranlagen wurde mit der Software MATLAB von MathWorks (MATHWORKS, 2011) entwickelt. Zum Entwurf eines Simulationsmodells wird die Toolbox Simulink verwendet. Zur Modellierung der biologischen Prozesse auf Grundlage des ASM1-Ansatzes wurde auf die Software SIMBA 6.0 zurückgegriffen.

Modellentwicklung

Auf Basis der diskutierten Modellgleichungen wurde ein Simulationsmodell entwickelt, das

auf dem idealisierten Porenmodell für Filtrationsanwendungen gemäß der Poisseuille-Strömung basiert. Das mathematische Modell berücksichtigt den Intrinsischen Widerstand (Membranwiderstand), den Deckschichtwiderstand und den Foulingwiderstand. Spezielle lokale Membrananlageneffekte können mit zusätzlichen Anlagenwiderständen erweitert bzw. abgebildet werden. Neben den bereits erwähnten Widerständen erfolgen zudem die Berechnung des Ruhedrucks, die Berechnung der dynamischen Viskosität aus der Temperatur sowie die Definition der Permeabilität. Auf Grundlage der im Kapitel 3.1 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

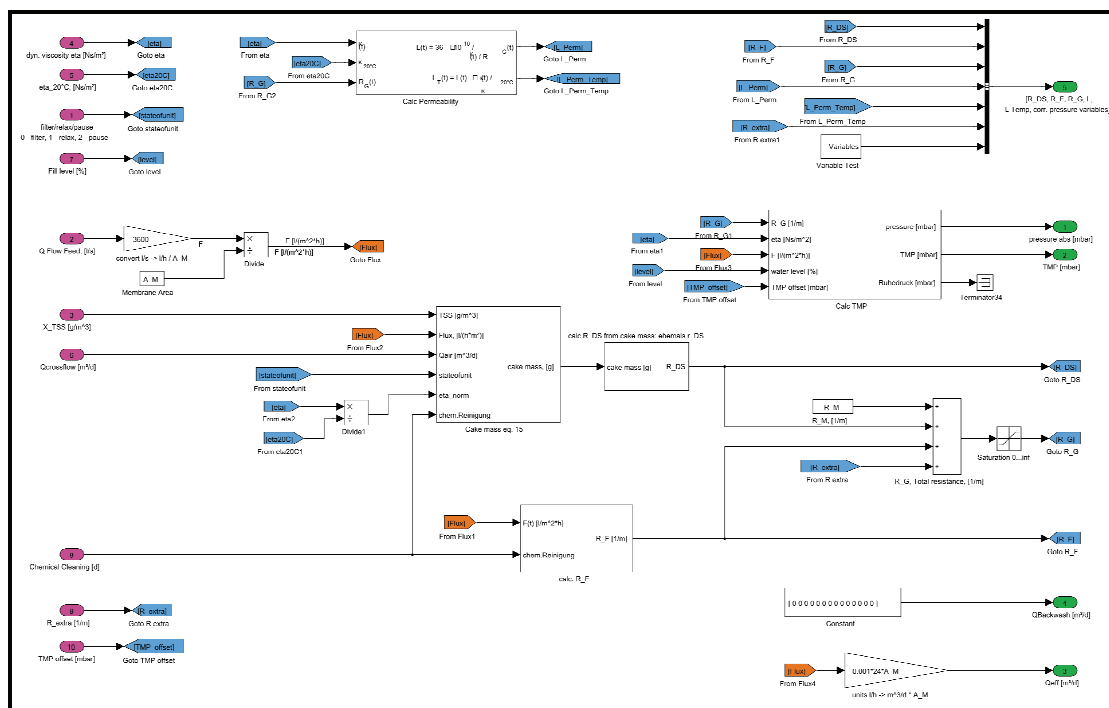


Bild 3-1: Allgemeines Simulationsmodell der Membranstufe im Detail

Erweitertes Simulationsmodell der Membranstufe Seelscheid

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 filtrieren 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.

3.2.1 Das Simulationsmodell am Beispiel der KA Seelscheid

Das komplette Simulationsmodell der Membrankläranlage Seelscheid ist in Bild 3-2 abgebildet. Die Messdaten werden aus einer Datenbank gelesen und speziell zur Zulauffraktionierung (ASM 1) weitergeleitet.

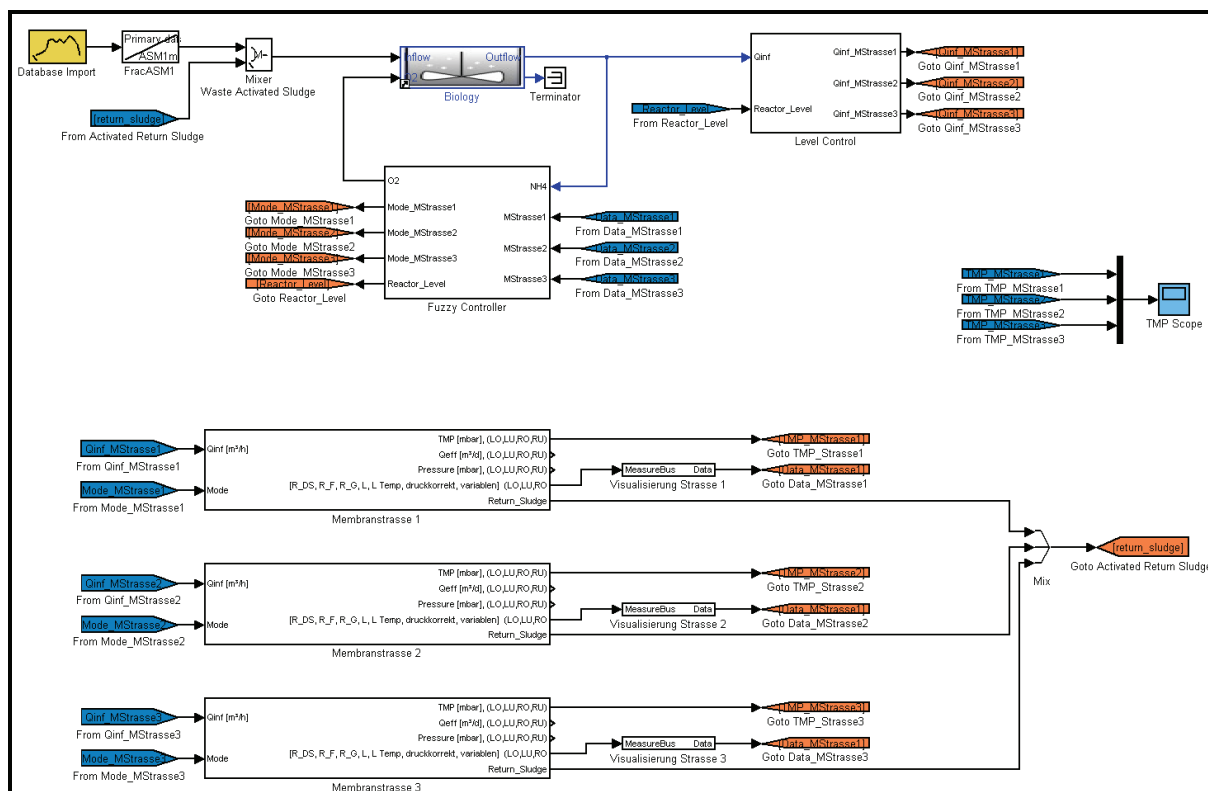


Bild 3-2: Aufbau des Simulationsmodells der Membrankläranlage Seelscheid (Biologie und Membranstraßen)

Ziel des Modells ist es, in Abhängigkeit der Zulaufbedingungen Vorhersagen darüber zu treffen, wie sich bei gegebener Verfahrensvariante der Zustand des Systems verändert. Sobald die Biologie für jede Straße simuliert wurde, kommt das Modell „Widerstand in Reihe“ zum Einsatz. Durch dieses Simulationsmodell konnte die Kompatibilität zum ASM 1 bewiesen werden. Die Teilprozesse Biologie und Membranstufe werden detailliert in der Langfassung des Berichtes erläutert.

3.2.2 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 .

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 $\hat{p}(\tau_i)$ mit den zu diskreten Zeitpunkten $0 \leq \tau_i \leq t$, $i=1, \dots, N$, gemessenen Drücken $p(\tau_i)$ verglichen. Da während der Kalibrierung der quadratische Fehler v mit

$$v = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (p(\tau_i) - \hat{p}(\tau_i))^2} \quad (\text{Gl.6})$$

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 anhand der Modellqualität bewertet, welches den quadratischen Fehler des Wertebereiches (Quantilbereich) der simulierten Drücke bezieht. Da die gemessenen, und damit auch die simulierten Daten, fehlerbehaftet sein können, d.h. Ausreißer beinhalten können, wird der Wertebereich für die simulierten Drücke $\hat{\mathbf{p}} = (\hat{p}(\tau_1), \dots, \hat{p}(\tau_i), \dots, \hat{p}(\tau_N))^T$, auf welchen normiert wird, über die Quantile q geschätzt.

$$v_{\%} = 100 - \frac{v}{q_{.9999}(\hat{\mathbf{p}}) - q_{.0001}(\hat{\mathbf{p}})} \quad (\text{Gl.7})$$

3.3 Modellkalibrierung und -validierung

Grundsätzlich ist das Simulationsmodell so ausgelegt, dass es verschiedene Membrankläranlagen abbilden kann. Um gute Ergebnisse für eine konkrete Anlage zu erreichen, müssen die Modellparameter jedoch an diese 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.

3.3.1 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 3-1 aufgeführt.

Tabelle 3-1: Ergebnisse der Kalibrierung und Validierung der KA Seelscheid

	Kalibrierung		Validierung		Kalibrierung	Validierung
	Oben	Unten	Oben	Unten	Oben und unten	Oben und unten
Straße 1	95,6	95,2	91,9	89,4	95,4	90,7
Straße 2	95,5	95,7	90,7	90,6	95,6	90,6
Straße 3	94,7	95,9	90,1	91,5	95,3	90,8
Mittelwert:					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 3-3 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 Ausreißer, welche auf eine hydraulische Belastung zurückzuführen sind, wird der gemessene Wert gut vom simulierten Messwert nachgebildet.

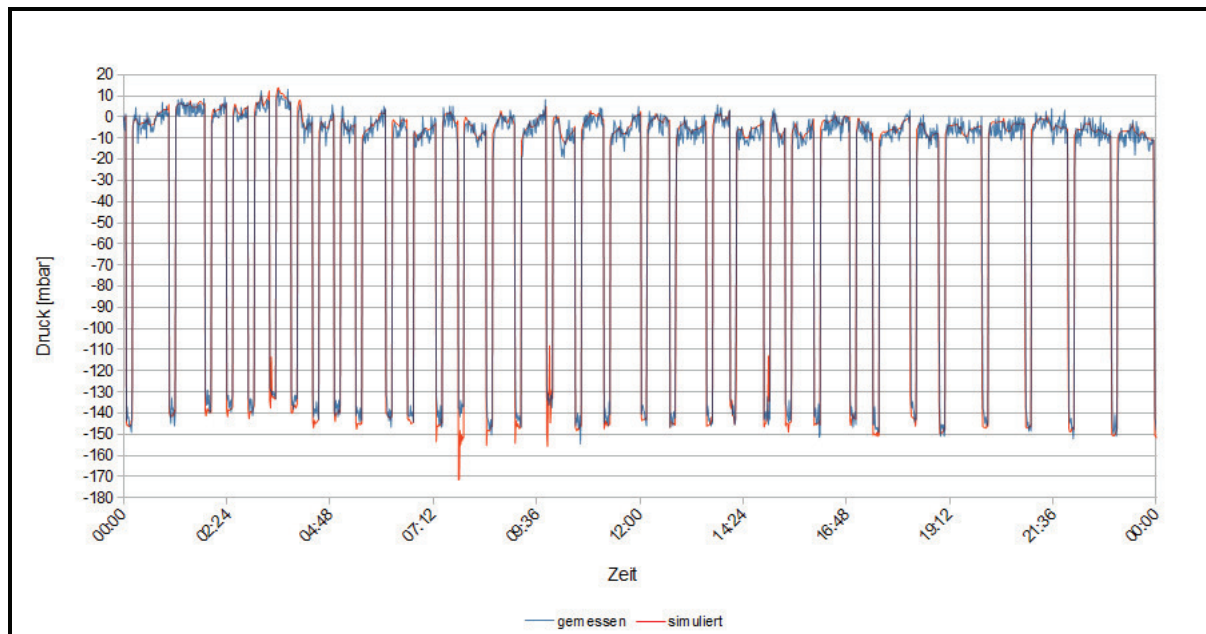


Bild 3-3: Kalibrierung der Straße 1, Element oben links am 02.04.2010

Ein hydraulische Lastwechsel kann in Bild 3-4 anhand der Verkürzung der Pausenintervalle beobachtet werden. Dies Verhalten konnte auch durch die Validierung vom 26.04.2010 von

Straße 3, Element rechts oben, nachgebildet werden. Der hydraulische Lastwechsel beginnt um 07:12 Uhr. Die Filtrationspause wird kleiner und der Permeat-Flux steigt an.

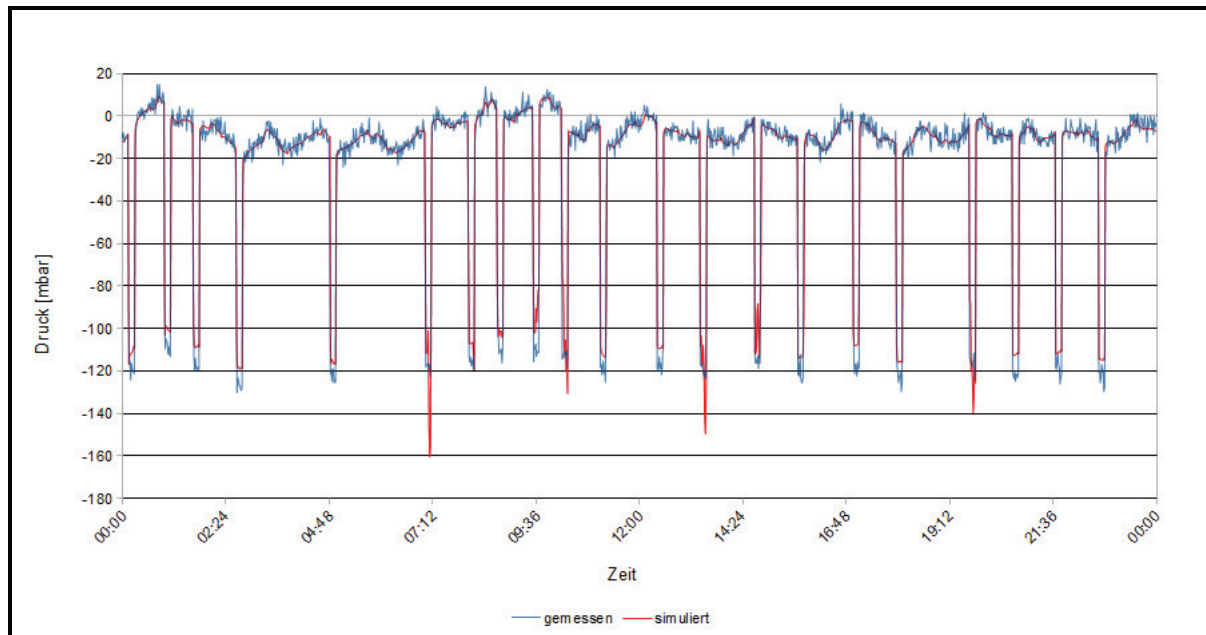


Bild 3-4: Validierung Straße 3, Element rechts oben am 26.04.2010

Trotz dieser Abweichungen, 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. Der Validierungszeitraum umfasst stark unterschiedliche Betriebszustände.

Tabelle 3-2: Kalibrierungs- und Validierungsergebnisse der simas-Anlage

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

Wie in Tabelle 3-2 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.

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 3-3 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 3-3: Ergebnisse der Kalibrierung und Validierung der KA Konzen

	Kalibrierung		Validierung		Kalibrierung	Validierung
	Oben	Unten	Oben	Unten	Oben und unten	Oben und unten
Straße 1	95,1	94,0	93,9	92,7	94,5	93,3
Straße 2	95,3	94,6	94,9	93,4	95,0	94,2
Straße 3	94,3	91,4	93,9	87,1	92,8	90,5
Straße 4	93,9	92,1	93,4	92,0	93,0	92,7
Straße 5	94,4	93,2	82,2	55,5	93,8	68,9
Straße 6	94,2	92,9	94,8	93,1	93,6	94,0
Straße 7	94,1	93,6	93,0	92,5	93,8	92,7
Straße 8	85,5	80,3	87,8	78,8	82,9	83,3
Mittelwert:					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.

3.3.2 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. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3-4 dargestellt, der mittlere Validierungswert der Modellqualität betrug 86,1%. 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 3-4: Kalibrierung und Validierung der KA Nordkanal

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

3.4 Aufbau einer modellbasierten Bedienerunterstützung und des Schulungssimulators

Auf Basis der Idee eines Flugsimulators wurde im Projekt ein Membrankläranlagen-Simulator entwickelt, der es Anwendern mit unterschiedlichem Kenntnisstand ermöglicht, sich mit dem Prozess der Membranfiltration detailliert auseinanderzusetzen. Der Simulator wurde auf Basis des mathematischen Modells des zuvor beschriebenen Simulationsmodells entwickelt. Dieser bietet die Möglichkeit im Rahmen von Schulungen „reale“ Betriebsverläufe von vorkonfigurierten oder selbsterstellten Anlagen abzubilden.

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 entwickelten mathematischen Modells der Membranstufe

In Bild 3-5 wird die Oberfläche des Simulators dargestellt. Um den Nutzer möglichst schnell mit allen nötigen Informationen zur Verwendung des Simulators zu versorgen, wurde ein Handbuch erstellt. Dieses kann entweder über den Hilfeintrag des Hauptmenüs oder über die Menüs der Modellblöcke geöffnet werden. Eine detaillierte Beschreibung aller Funktionen ist dem Handbuch zu entnehmen, die wichtigsten sind nachfolgend aufgeführt.

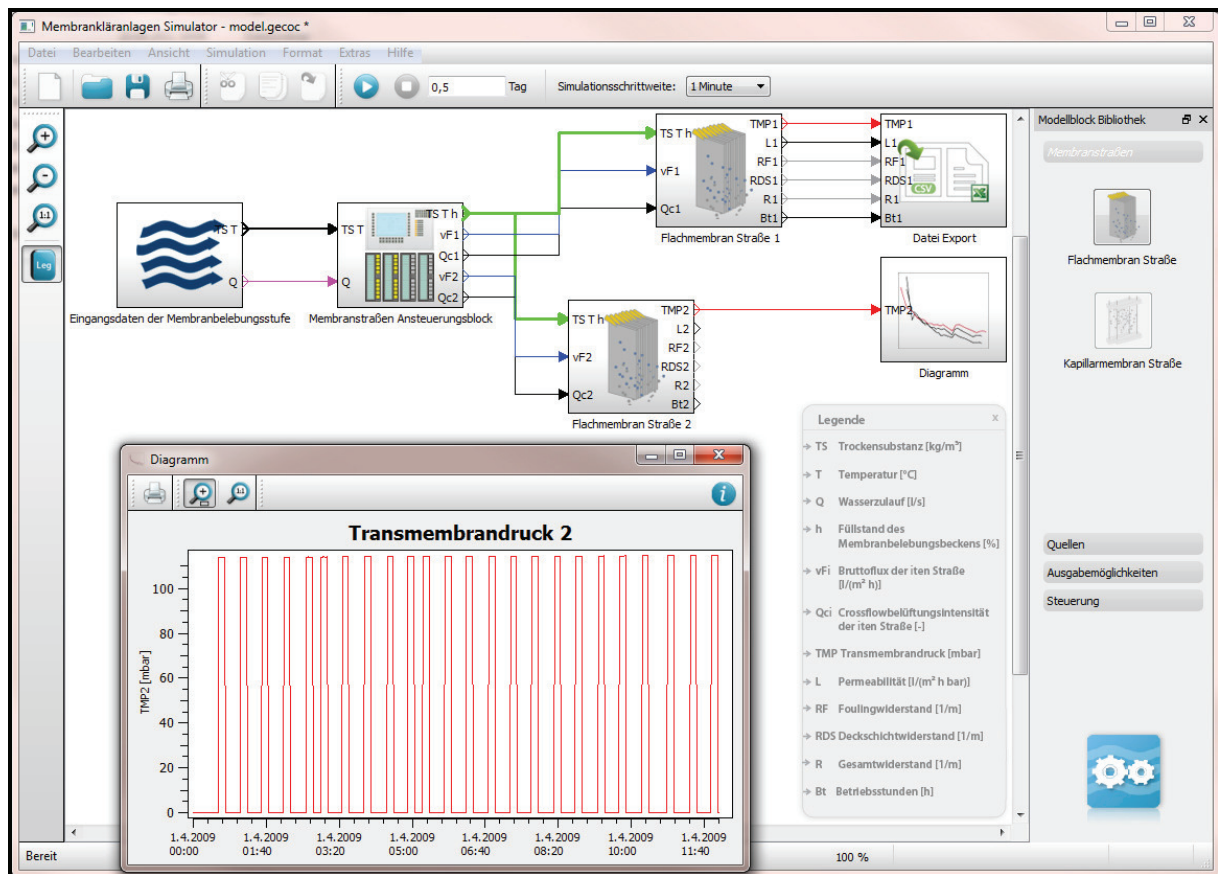


Bild 3-5: Benutzeroberfläche des Membrankläranlagen-Simulators

Aufbau der Anlagenkonfiguration

Im Simulator können Membranbelebungsanlagen mit einer variablen Anzahl von Membranstraßen aufgebaut und parametrisiert werden. Um eine Kalibrierung durchführen zu können, wird der Nutzer zur „Web-Oberfläche zur Nutzung des Simulators“ geleitet. 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 Crossflowbelüftung oder Vorgaben zur Art der chemischen Reinigung.

Die Simulationsergebnisse können anschließend grafisch innerhalb der Programmumgebung dargestellt werden. Zudem besteht die Möglichkeit, die Ergebnisse in ein Standardformat zu exportieren.

Web-Oberfläche zur Nutzung des Simulators

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 reale Verhalten der Anlage widerspiegeln, sondern das Verhalten der Referenzanlagen. Aus diesem Grund wurde eine Online-Plattform „membran.gecoc-projects.de“ entwickelt, mit der ein Anlagenbetreiber eine anlagenspezifische Kalibrierung durchführen kann, um das eigene Anlagenverhalten gut abzubilden.

3.5 Optimierung der Prozessregelung

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. Nicht alle Optimierungsmethoden konnten in der Projektlaufzeit auf der realen Anlage durchgeführt werden, da für einen abgesicherten Erkenntnisgewinn längere Versuchsdurchführungen benötigt werden. Unter anderem 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 zu dem Simulationsergebnis) kann anschließend eine Optimierungsmethode weitere Wertepaare erzeugen, welche den Informationsgewinn optimiert und damit zum Finden einer optimalen Lösung führt (s. Bild 3-6). Es werden Wertepaare so lange 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.

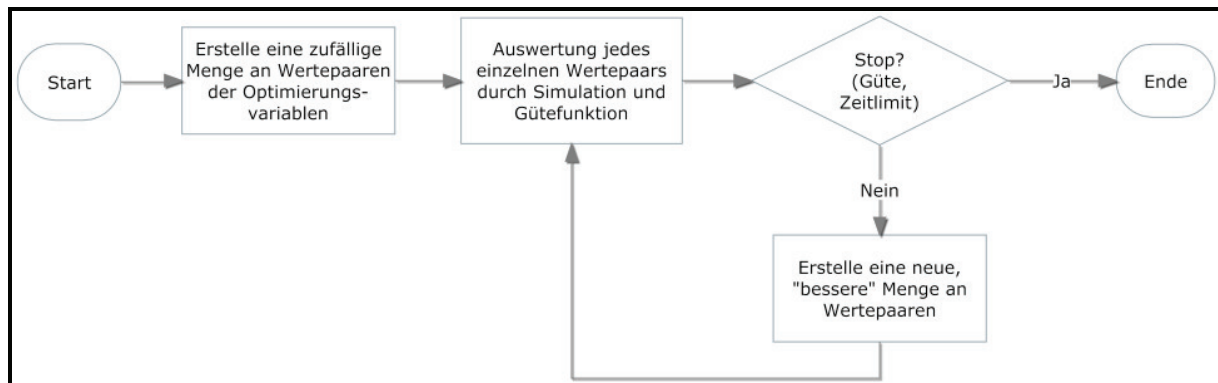


Bild 3-6: Zielfunktion der Optimierungsprobleme

Die Zielfunktion bzw. Gütefunktion, welche bestimmt was optimiert werden soll, ist für alle untersuchten Optimierungsaufgaben identisch und beschreibt, dass möglichst viel Wasser mit möglichst geringem Energie- und damit Kostenaufwand filtriert werden soll. Die genaue Definition der Zielfunktion, sowie alle Ergebnisse befinden sich in der Langfassung des Berichtes.

Anhand der dort publizierten Ergebnisse kann das große Optimierungspotential durch die modellbasierte Parameteroptimierung aufgezeigt werden, wodurch sich der Anlagenbetrieb kosten- und energieeffizienter gestalten lässt. Dabei ist deutlich 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.

4 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>
Nutzung des Simulationssystems zu Optimierungs- und Schulungszwecken (SIMAS)	<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>
Entwicklung eines umfassenden Automatisierungssystems für Membranbelebungsanlagen	<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“ 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/ 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.