



TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

FAKULTÄT III – PROZESSWISSENSCHAFTEN
INSTITUT FÜR TECHNISCHEN UMWELTSCHUTZ

FACHGEBIET UMWELTVERFAHRENSTECHNIK

Prof. Dr.-Ing. S.U. Geißen

- Bachelorarbeit -

**Prozessüberwachung von Membranbioreaktoren durch
Einsatz moderner Messtechnik**

–

**Praktische Anwendung einer Ammonium-basierten
Sauerstoffregelung zur Betriebsoptimierung im
Pilotmaßstab**

Verfasser

Katharina Baron

Matrikelnummer

374788

Abgabedatum

25.02.2022

Betreuer

Dr.-Ing. Kuangxin Zhou

M.Sc. Malena Kieselbach

Abstract

The objective of this study is the practical application of an ammonium-based oxygen control for the operational optimization of the membrane wastewater treatment plant in Stahnsdorf by means of modern measurement technology on a pilot scale. For this purpose, the following two research questions are posed: How can ammonium-based oxygen control be implemented for MBR technology with safe nitrogen removal? And can energy consumption be reduced using ammonium-based oxygen control?

To answer these questions, oxygen-based oxygen control was conducted for a period of 17 days and ammonium-based control for 57 days for comparison. This was initially started as a "feedback control", but was changed to the "feedforward control" due to unreliable probe measurements in the nitrification and effluent. Laboratory and on-line data were collected over these sampling periods. The experimental results showed that effluent quality is highly dependent on the reliability of the measurement technique. The calculation of air volume and power consumption suggested that the ammonium-based control saved both air volume and power, and thus energy. However, effluent quality needs to be improved, which can be solved by expansion with other controls.

Erklärung zur selbstständigen Anfertigung der Arbeit

Ich versichere eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommene Textstellen, Bilder, Tabellen u. a. sind unter Angabe der Herkunft kenntlich gemacht.

Weiterhin versichere ich, dass diese Arbeit noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt wurde.

Berlin, am 25.02.2022

.....
Katharina Baron

Inhalt

Abstract	1
Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis.....	6
Symbolverzeichnis.....	7
1. Einleitung	8
2. Grundlagen der MBR-Technik und der biologischen Abwasserreinigung	11
2.1. Allgemeine Grundlagen der Stofftrennung mit Membranen	11
2.2. Grundlagen der aeroben biologischen Abwasserreinigung	14
2.3. Vor- und Nachteile der Membranfiltrationstechnologie.....	19
3. Energetische Optimierung der Belüftung der MBR-Anlage	22
3.1. Optimale Belüftungsregelung durch Sauerstoff-Messung	22
3.2. Optimierung der Belüftung durch Ammonium-basierte Regelung	23
3.3. Energetische Optimierung der Membrananlage Nordkanal	25
4. Material und Methode	28
4.1. MBR-Pilotanlage	28
4.2. Standort und verwendetes Abwasser	30
4.3. Verwendete Messtechnik in der Pilotanlage.....	31
4.3.1. Messung der Parameter Ammonium und Nitrat.....	32
4.3.2. Messung des gelösten Sauerstoffs.....	33
4.3.3. Messung der Stickstoff- und Kohlenstoffverbindungen.....	34
4.4. Kalibrierung, Wartung und Inspektion der Messgeräte	35
4.5. Labormessungen	38
4.6. Versuchsdurchführung.....	40
4.7. Datenauswertung.....	44
5. Ergebnisse und Diskussion	45
5.1. Auswertung der Ablaufqualität.....	45
5.2. Sauerstoff-basierte Regelung	47
5.3. „feedback control“ Regelung.....	48
5.4. „feedforward control“ Steuerung	51

5.5. Berechnung des Luft- und Energieverbrauchs der verschiedenen Regelungs- und Steuerungstechniken	55
5.6. Betriebserfahrung mit den NH ₄ - und NO ₃ -Online-Messgeräten	63
6. Zusammenfassung und Ausblick.....	65
7. Literaturverzeichnis.....	67
8. Anhang	70

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Dreistufiger Lösungsansatz des Projektes MBR 4.0	9
Abb. 2: Einteilung der Membranverfahren (G. Baumgarten, 1998)	11
Abb. 3: Schematische Darstellung des Membranprozesses (Krebber, 2013)....	12
Abb. 4: Die Betriebsweisen Dead-End und Cross-Flow graphisch dargestellt (Melin & Rautenbach, 2007)	13
Abb. 5: Fließschema eines MBR mit vorgeschalteter Denitrifikation (Krebber, 2013).....	16
Abb. 6: Verteilung des Stromverbrauchs des MBR Nordkanal (Krebber, 2013)	20
Abb. 7: Regel- und Steuersystem (Olsson & Newell, 1999).....	24
Abb. 8: Vergleich der Belüftung, basierend auf der Ammoniummessung (links) und einer regelmäßig periodischen Belüftung (rechts) (Barfüßer, 2018)	25
Abb. 9: Fließschema des MBR Nordkanal (Drensla et al, 2015).....	26
Abb. 10: Vereinfachtes Fließschema der Pilotanlage in Stahnsdorf	28
Abb. 11: Innenraum des Containers, in dem sich die Pilotanlage befindet (links) und Blick auf den Filtrationstank (rechts)	29
Abb. 12: Funktionsweise des Lumineszenzverfahrens.....	34
Abb. 13: Funktionsweise der optischen Messung (Heuermann, 2017)	35
Abb. 14: 2-Punktkalibrierung: lineare Kurve von zwei Standardlösungen (C1 und C2) und die resultierenden Potenziale E1 und E2.....	36
Abb. 15: Kalibriergerade des OPUS-Tauchsensors	37
Abb. 16: Ammoniumlaborwerte des Ablaufs 15.06.2021–13.12.2021	45
Abb. 17: Nitratlaborwerte des Ablaufs 15.06.2021–13.12.2021	46
Abb. 18: CSB-Laborwerte des Zulaufs und Ablaufs vom 21.06.2021–13.12.2021	47
Abb. 19: Labor- und Onlinedaten der Ammoniumwerte in der Nitrifikation	48
Abb. 20: Labor- und Onlinedaten der Ammoniumwerte im Ablauf	50
Abb. 21: Labor- und Onlinedaten der Nitratlablaufwerte	51
Abb. 22: Labor- und Onlinedaten der Ammoniumkonzentration im Zulauf.....	52
Abb. 23: Labor- und Onlinemessungen der Ammoniumkonzentration in der Nitrifikation vom 22.11.2021–13.12.2021	53
Abb. 24: Labor- und Onlinemessungen der Ammoniumkonzentration im Ablauf vom 22.11.2021–13.12.2021	54
Abb. 25: Labor- und Onlinemessungen der Nitratkonzentration im Ablauf	55
Abb. 26: Ammonium Zulauf und Belüftung der Membranen vom 17.11.2021- 13.12.2021	56
Abb. 27: Ammonium Zulauf und Belüftung der Membranen vom 17.11.2021- 03.12.2021	57
Abb. 28: Ammonium Zulauf und Belüftung der Membranen vom 28.11.2021-	

07.12.2021	58
Abb. 29: Ammonium-Zulauf und Belüftung der Membranen vom 05.12.2021–	
13.12.2021	59

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Vergleich der erzielbaren Reinigungsleistung zwischen konventionellen Kläranlagen und Membranbelebungsanlagen (Grinwis, 2008).	8
Tab. 2: Anforderungen an das Abwasser zur Einleitung	15
Tab. 3: Membrandaten der MBR-Pilotanlage.....	30
Tab. 4: Abwasserzusammensetzung des verwendeten Abwassers	31
Tab. 5: Auflistung der verwendeten Qualitätsmessung	31
Tab. 6: Reinigungs-, Kalibrierungs- und Überprüfungszyklen der jeweiligen Sonden	35
Tab. 7: Übersicht zu den verwendeten Küvettentests.....	38
Tab. 8: Übersicht über die Versuchsabschnitte der Pilotanlage	40
Tab. 9: Belüftung der Nitrifikation anhand der Ammoniumwerte in der Nitrifikation	42
Tab. 10: Belüftung der Nitrifikation anhand des Ablaufwertes	43
Tab. 11: Belüftung des Membrantanks anhand der Ammoniumwerte im Zulauf	43
Tab. 12: Durchschnittliche Laborwerte der O ₂ -basierten Regelung.....	47
Tab. 16: durchschnittlicher, stündlicher Luftmengenverbrauch	60
Tab. 17: relativer Luftmengenverbrauch der unterschiedlichen Regelungen	61
Tab. 18: Stromverbrauch der verschiedenen Belüftungen	62
Tab. 19: Strom- und spezifische Energieverbräuche der verschiedenen Perioden	62
Tab. 20: Einstellung der Belüftung der Nitrifikation und des Ablauf 18.10.2021–09.11.2021	70
Tab. 21: Einstellung der Belüftung der Nitrifikation und des Ablaufs 09.11.2021–24.11.2021	70
Tab. 22: Einstellung der Belüftung der Nitrifikation und des Ablaufs ab dem 25.11.2021	71
Tab. 23: Einstellung der Belüftung des Membrantanks 17.11.2021–29.11.2021 und 07.12.2021–13.12.2021 ohne Air-Cycling	71
Tab. 24: Einstellung der Belüftung des Membrantanks 29.11.2021–03.12.2021	72
Tab. 25: Einstellung der Belüftung des Membrantanks 03.12.2021–06.12.2021	72
Tab. 26: Einstellung der Belüftung des Membrantanks 06.12.2021–07.12.2021	72
Tab. 27: Übersicht der Laborwerte.....	73

Abkürzungsverzeichnis

AbwV	Abwasserverordnung
AFS	Abfiltrierbare feste Stoffe
BB	Belebungsbecken
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BSB ₅	Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen
CH ₂ O	Formaldehyd
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
O ₂	Sauerstoff
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
EG	Europäische Gemeinschaft
H ₂ O	Wasser
MBR	Membranbelebungsreaktor
N _{ges}	Stickstoff gesamt, Summe von Ammonium-, Nitrit- und Nitratstickstoff
N ₂	Gasförmiger Stickstoff
NH ₃	Ammoniak
NH ₄	Ammonium
NH ₄ -N	Ammoniumstickstoff
NO ₂	Nitrit
NO ₃	Nitrat
OH ⁻	Hydroxid-Ionen
TS	Trockensubstanz
t _{TS}	Schlammalter
V _{BB}	Volumen des Belebungsbeckens

Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Dimension
β_{GT}	Gesamt trockenrückstand der unfiltrierten Probe	$G \cdot L^{-1}$
T	Lebensdauer	s
A_M	Membranfläche	m^2
$C_{CSB, Ablauf}$	Konzentration des CSBs im Ablauf	$mg \cdot L^{-1}$
$C_{N, ges, Ablauf}$	Konzentration des gesamten Stickstoffs im Ablauf	$mg \cdot L^{-1}$
$C_{P, ges, Ablauf}$	Konzentration des gesamten Phosphors im Ablauf	$mg \cdot L^{-1}$
L_p	Permeabilität	$L m^{-2} h^{-1} bar^{-1}$
m_a	Masse der leeren Schale + Filter	g
m_b	Masse der Schale + Filter + Trockenmasse	g
m_T	Trockenmasse	g
P_P	Druck auf Permeatseite	bar
P_S	Hydrostatischer Druck an der Messstelle oder Ruhedruck	bar
Q_F	Permeatvolumenstrom	$L h^{-1}$
V_F	Permeatfluss	$L m^{-2} h^{-1}$
V_P	Volumen der eingesetzten unfiltrierten Wasserprobe	mL
Δp_{TM}	Transmembrandruck	bar

1. Einleitung

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit dem Thema: „Prozessüberwachung von Membranbioreaktoren durch Einsatz moderner Messtechnik-Praktische Anwendung einer Ammonium-basierten Sauerstoffregelung zur Betriebsoptimierung im Pilotmaßstab“ und entsteht im Rahmen des BMBF-geförderten Forschungsprojektes „Entwicklung digitaler Lösungen zur Optimierung von Membranbelebungsreaktoren (MBR 4.0)“.

Es ist wissenschaftlich von Relevanz, sich mit der MBR-Technik zu befassen und diese weiter zu etablieren und zu entwickeln, da diese geringeren Platz benötigt als konventionelle Abwasseranlagen und hervorragende Ablaufqualität hervorbringt (MARTIN Systems, o.D.). Die Ablaufqualitäten sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tab. 1: Vergleich der erzielbaren Reinigungsleistung zwischen konventionellen Kläranlagen und Membranbelebungsanlagen (Grinwis, 2008).

Parameter	konventionelle Kläranlage	Membranbelebungsanlage
Feststoffe (AFS) [$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$]	10–15	0
$C_{\text{CSB,Ablauf}}$ [$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$]	40–50	< 30
$C_{\text{N_ges,Ablauf}}$ [$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$]	< 13	< 13
$C_{\text{P_ges,Ablauf}}$ [$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$]	0,8–1,0	< 0,3
mikrobiologische Qualität	bedenklich	Badegewässerqualität gemäß Richtlinie 2006/7/EG

Wie Tabelle 1 zeigt, werden Feststoffe in Membranbelebungsanlagen im Gegensatz zu konventionellen Anlagen vollständig zurückgehalten. Außerdem werden wesentlich bessere Ablaufwerte bezüglich des chemischen Sauerstoffbedarfs und des Phosphors erzielt. Dies kann allerdings in anderen Anlagen anders ausfallen. Bei der betrachteten Pilotanlage existieren teilweise Werte über $35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ CSB. Die Reinigungsleistung hinsichtlich der Stickstoffablaufwerte ist vergleichbar, aber die mikrobiologische Qualität erfüllt bei Membranbelebungsanlagen Badegewässerqualität, wohingegen diese in Abwässern von konventionellen Kläranlagen bedenklich ist.

Bei der Analyse des Energieverbrauchs einer Kläranlage ist festzustellen, dass die Belüftung beim Reinigungsprozess bei einer konventionellen Kläranlage bis zu 75 % des Energieverbrauchs ausmacht (Rosso, et al., 2008). Bei

Membranbioreaktoren stellt die Belüftung ebenfalls den größten Teil des Energieverbrauchs dar (Kreber, 2013), welcher höher ausfällt als bei konventionellen Kläranlagen, da nicht nur die Belebung, sondern auch die Membranen belüftet werden. 70–80 % des Gesamtenergieverbrauchs belaufen sich auf die Belüftung (Jianyu et al., 2021). Deshalb werden Lösungen gesucht, um bei der Belüftung Energie einsparen zu können, wodurch die Betriebskosten gesenkt werden. Zusätzlich soll die hohe Abwasserqualität beibehalten wird (Uprety et al., 2015). In der vorliegenden Arbeit wird als Lösungsansatz die Ammonium-basierte Sauerstoffregelung getestet.

Im Projekt MBR 4.0 sollen digitale Lösungen zur Optimierung der Steuerungs- und Regelungstechnik sowie des Wartungsmanagements für dezentrale Membranbelebungsreaktoren entwickelt werden.

Wie in der folgenden Abbildung 1 zu erkennen, gliedert sich das Projekt in drei Stufen.

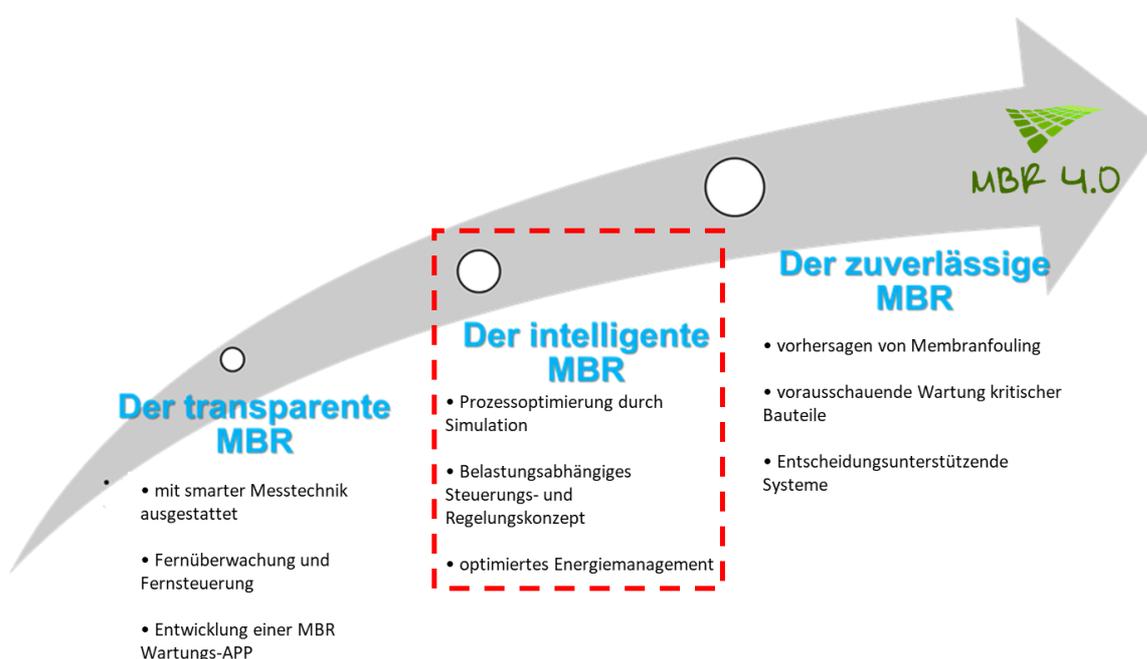


Abb. 1: Dreistufiger Lösungsansatz des Projektes MBR 4.0

In der Stufe des transparenten MBRs soll durch smarte Messtechnik eine Fernüberwachung und -steuerung ermöglicht werden. Die Stufe des intelligenten MBRs thematisiert die Prozessoptimierung, Steuer- und Regelungskonzepte und ein optimiertes Energiemanagement. In dieser Stufe wurde der Lösungsansatz für

das Forschungsthema dieser Arbeit getestet. Die Ziele der dritten Stufe sind: das Membranfouling vorherzusagen, eine vorausschauende Wartung kritischer Bauteile durchzuführen und entscheidungsunterstützende Systeme zu implementieren. Die Pilotanlage wurde März 2021 auf dem Gelände des Klärwerks Stahnsdorf in Betrieb genommen und wird sich bis Februar 2022 dort befinden. Der Versuchszeitraum für die Daten dieser Arbeit beschränkt sich auf die Zeit vom 15.06.2021 bis 13.12.2021.

Mit der vorliegenden Arbeit sollen die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Wie kann die Ammonium-basierte Sauerstoffregelung für MBR-Technik mit sicherer Stickstoffentfernung umgesetzt werden?
- Kann der Energieverbrauch mittels Ammonium-basierter Sauerstoffregelung reduziert werden?

Diese Fragen sollen bei der praktischen Anwendung der Ammonium-basierten Sauerstoffregelung in der Pilotanlage beantwortet werden.

Die Testung der Regelung erfolgt auf verschiedene Weise. Zuerst wird die Belüftung der Nitrifikation anhand der Ammoniumwerte in der Belebung und im Ablauf geregelt, anschließend wird die Belüftung der Membranen auf Grundlage der Ammoniumwerte im Zulauf gesteuert.

2. Grundlagen der MBR-Technik und der biologischen Abwasserreinigung

2.1. Allgemeine Grundlagen der Stofftrennung mit Membranen

Die Membrantechnologie wird für die Stofftrennung eingesetzt, welche weder biologisch noch chemisch, sondern durch rein physikalische Mechanismen stattfindet (MARTIN Systems, o.D.). Durch die Membranfilter wird die Nachklärung im Belebungsverfahren ersetzt. Die Membranen können dabei direkt im Belebungsbecken oder in einem separaten Filtrationstank angeordnet sein. Die zweite Variante erweist sich als sinnvoller, da auf diese Weise chemische Reinigungen sowie Reparatur- und Wartungsarbeiten leichter durchzuführen sind (Grinwis, 2008).

Membranbioreaktoren werden für die Reinigung kommunaler Abwässer eingesetzt und ermöglichen dabei die Entfernung von Bakterien, Viren und parasitären Krankheitserregern. Was aus dem Abwasser mit den Membranen entfernt werden kann, hängt von der Art der Filtration ab (siehe Abbildung 2).

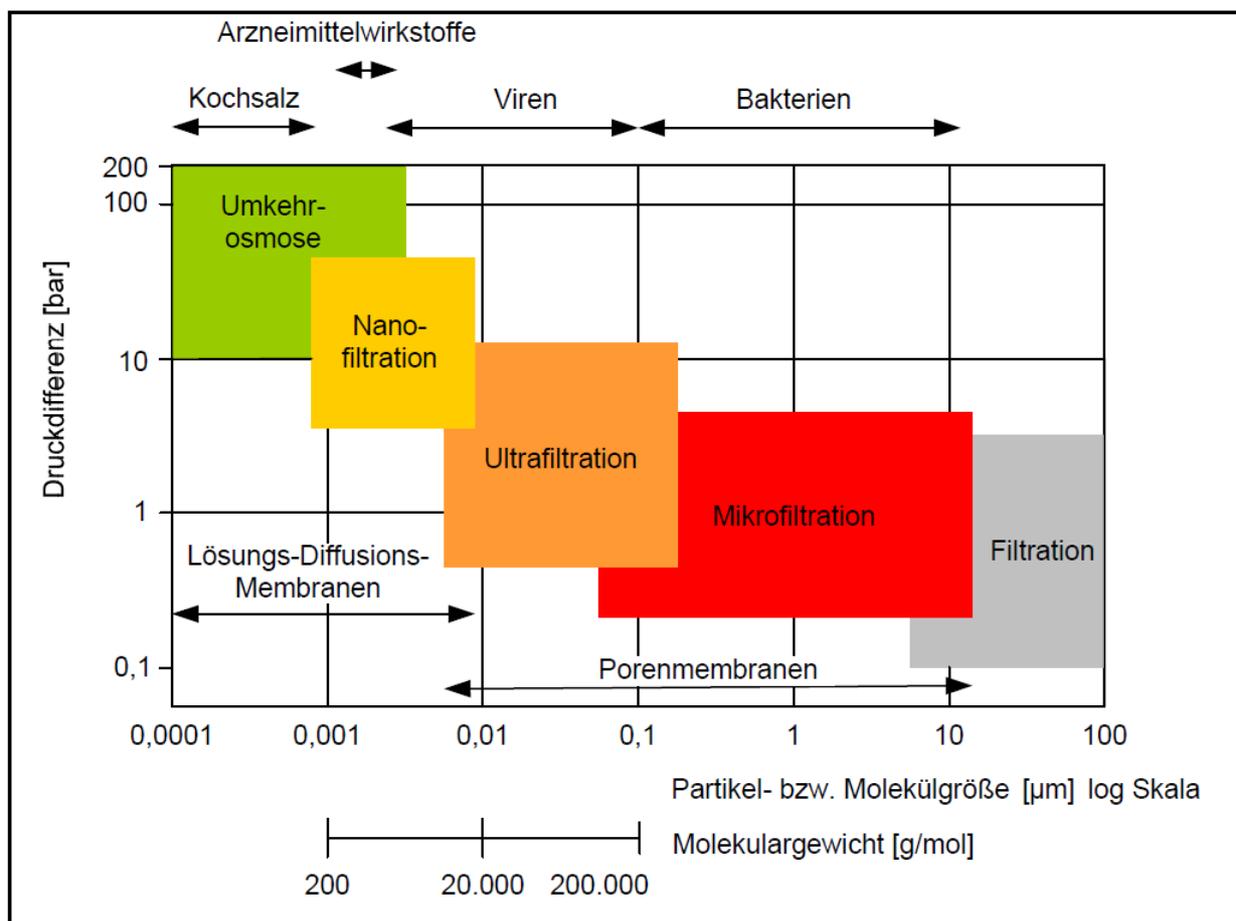


Abb. 2: Einteilung der Membranverfahren (G. Baumgarten, 1998)

Mit der Mikrofiltration werden bereits Bakterien zurückgehalten. Um zusätzlich Viren zu entfernen, ist die Ultrafiltration anwendbar. Arzneimittel hingegen werden erst bei Nanofiltration und Umkehrosmose ausgesondert. Die Komponenten, die dann die Membran passieren werden als Permeat/Filtrat bezeichnet, die zurückgehaltene Phase als Konzentrat bzw. Retentat (siehe Abbildung 3) (Krebber, 2013).

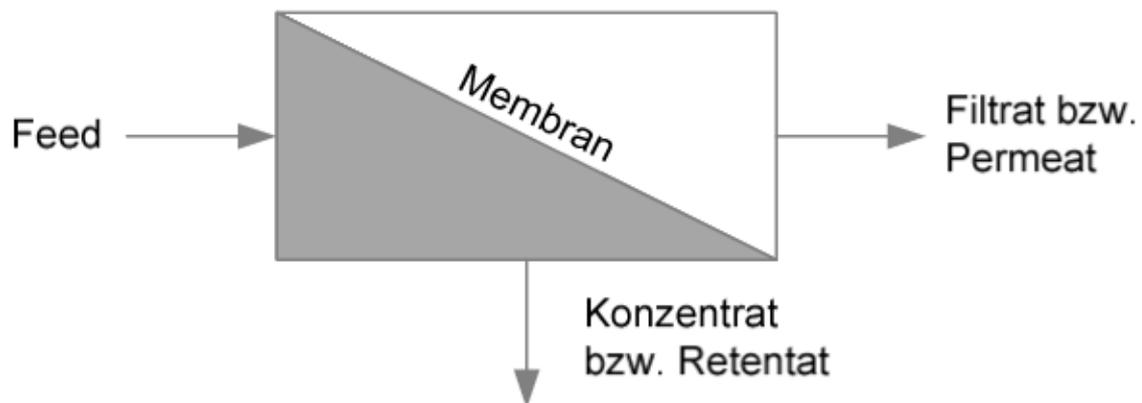


Abb. 3: Schematische Darstellung des Membranprozesses (Krebber, 2013)

Der Transport durch die Membran erfolgt dann aufgrund von Diffusion. Zu den Kenngrößen der Leistungsfähigkeit der Membranen gehören der Fluss und die Permeabilität. Der Permeatfluss ist der auf die Membranfläche bezogene Filtrat- bzw. Permeatvolumenstrom. Kurz, der Durchsatz durch die Membran. Dieser wird mit folgender Gleichung (1) berechnet (DWA, 2014):

$$V_F = \frac{Q_F}{A_M} \quad \left[\frac{l}{m^2 \cdot h} \right] \quad (1)$$

V_F = Permeatfluss $\left[\frac{l}{m^2 \cdot h} \right]$
 A_M = Membranfläche $[m^2]$
 Q_F = Permeatvolumenstrom $\left[\frac{l}{h} \right]$

Die Permeabilität ist die Kenngröße zur Beschreibung der Durchlässigkeit. Berechnet wird sie mit der folgenden Formel (2) (DWA, 2014) :

$$L_P = \frac{V_F}{\Delta p_{TM}} \quad \left[\frac{l}{m^2 \cdot h \cdot bar} \right] \quad (2)$$

Δp_{TM} = Transmembrandruck [bar]

Der Transmembrandruck bezeichnet die Druckdifferenz zwischen der Feed- und Permeatseite der Membranen und wird gemäß Gleichung (3) (DWA, 2014) bestimmt:

$$\Delta p_{TM} = P_S - P_P \quad (3)$$

P_S = hydrostatischer Druck an der Messstelle oder Ruhedruck [bar]

p_P = Druck auf Permeatseite [bar]

Bei Membranbelebungsreaktoren wird das Belebungsbecken mit einer Membranfiltration kombiniert, um den Belebtschlamm abzutrennen. Für diese Membrantechnologie gibt es verschiedene Bauformen und Betriebsweisen. Bezogen auf die Bauform kann zwischen flachen und rohrförmigen Membranen unterschieden werden. Zur ersten Art gehören das Platten-, Kissen- und Wickelmodul und zur zweiten das Rohr-, Kapillar- und Hohlfasermodule (Grinwis, 2008).

In dieser Arbeit werden die Membranen mit Plattenmodulen näher erläutert, bei welchen die Membranplatten parallel angeordnet sind, da diese in der betrachteten Pilotanlage eingesetzt werden.

Für diese Module gibt es zwei mögliche Betriebsweisen. Zum einen den Cross-Flow Betrieb, bei welchem die Membranen parallel zu ihrer Oberfläche angeströmt werden und zum anderen die senkrechte Anströmung der Membranen, welche als Dead-End-Betrieb bezeichnet wird und bei Rohrmembranen zum Einsatz kommt (Grinwis, 2008). In der folgenden Abbildung sind die beiden Prinzipien der Betriebsweisen dargestellt.

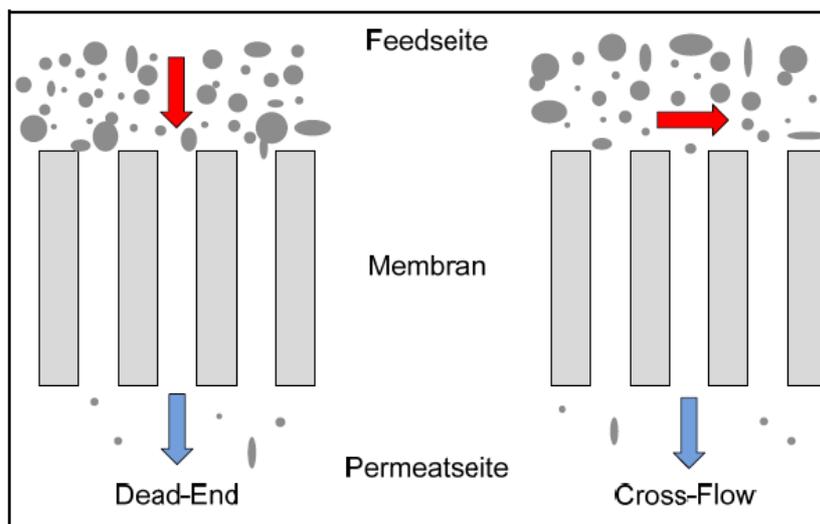


Abb. 4: Die Betriebsweisen Dead-End und Cross-Flow graphisch dargestellt (Melin & Rautenbach, 2007)

Allerdings kann weder durch den Cross-Flow- noch den Dead-End-Betrieb verhindert werden, dass nach einer gewissen Zeit das Fouling und Scaling auftritt. Beim Biofouling bildet sich durch Wachstum von Mikroorganismen an der Membranoberfläche ein Biofilm, der die Leistung der Permeabilität mindert. Das Scaling führt zu einem Verstopfen der Membranen durch die ausgefallenen Salzkristalle, die sich auf der Membranoberfläche anlagern (Pinnekamp & Friedrich, 2003). Die Deckschicht ist ein tagtäglich Leistungsminderer, da sich hierbei die zurückgehaltenen Komponenten immer während der Filtrationsphase anlagern.

Dadurch steigt der Transmembrandruck, weshalb eine chemische Reinigung durchgeführt werden muss, sobald dieser sein Maximum erreicht hat. Diese ist abhängig von der Art der verwendeten Membranen.

Um die vollständige Funktionalität der Membranen gewährleisten zu können, ist eine mechanische Vorbehandlung des Abwassers unumgänglich, um beispielsweise Haare und andere faserige Abwasserinhaltsstoffe zu entfernen, die ansonsten Verzapfungen bilden und zu Verschlammungen an den Filtrationseinheiten führen können und somit die hydraulische Leistungsfähigkeit reduziert wird, weshalb es dann zu einem erhöhten Arbeitsaufwand, zum Beispiel in Form einer chemischen Reinigung kommen kann (Krebber, 2013).

2.2. Grundlagen der aeroben biologischen Abwasserreinigung

Zu den wichtigen Aufgaben eines Klärwerks gehört die Reduzierung des Stickstoffgehalts des Abwassers. Dies geschieht meistens mit Hilfe der Nitrifikation und Denitrifikation. Während dieser Prozesse wandeln Bakterien die Stickstoffverbindungen in gasförmigen Stickstoff um (Barfüßer, 2018).

Das Grundprinzip der biologischen Abwasserreinigung beruht darauf, dass Mikroorganismen die im Abwasser gelösten Schadstoffe abbauen. Dafür gibt es zwei mögliche Verfahren. Zum einen das Festbettverfahren, bei dem die Mikroorganismen an den Bewuchsflächen fixiert sind und zum anderen das Belebtschlammverfahren, bei dem Mikroorganismen im Abwasser freigesetzt sind (Gujer, 2007). Dieses Verfahren wird auch in der in dieser Arbeit betrachteten Pilotanlage angewendet. Der Grund, warum dieser Prozess notwendig ist, besteht

darin, dass sich die verschiedenen im Abwasser enthaltenen Stickstoffverbindungen negativ auf die Umwelt auswirken. So können Ammonium und Nitrit ab bestimmten Konzentrationen giftig für Fische sein und Nitrat und CSB für eine Eutrophierung des Gewässers sorgen (Bayerisches Landesamt für Umwelt [LfU], 2013).

Die nachfolgende Tabelle 2 zeigt die Grenzwerte, die Abwasser in Berlin zur Einleitung in Gewässer einhalten muss. So darf beispielsweise der CSB bei einer Abwasserbehandlungsanlage der Größenklasse 4 nicht höher als $90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ sein und Ammoniumstickstoff keine Werte über $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ erreichen (Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch den Bundesminister der Justiz, 2022).

Tab. 2: Anforderungen an das Abwasser zur Einleitung

Proben nach Größenklassen der Abwasserbehandlungsanlagen	CSB [$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$]	$\text{NH}_4\text{-N}$ [$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$]	N_{ges} [$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$]
Größenklasse 1 kleiner als 60 kg/d BSB_5 (roh)	150	/	/
Größenklasse 2 60 bis 300 kg/d BSB_5 (roh)	110	/	/
Größenklasse 3 größer als 300 bis 600 kg/d BSB_5 (roh)	90	10	/
Größenklasse 4 größer als 600 bis 6000 kg/d BSB_5 (roh)	90	10	18
Größenklasse 5 größer als 6000 kg/d BSB_5 (roh)	75	10	13

Im Weiteren wird genauer auf die aerobe biologische Abwasserreinigung eingegangen.

Für die Reduzierung des Stickstoffgehaltes im Abwasser wird die Denitrifikation und Nitrifikation im Hauptstrom eingesetzt. Da sich diese Arbeit mit dem Membranbioreaktor aus dem Pilotprojekt MBR 4.0 in der Kläranlage Stahnsdorf beschäftigt, werden im Folgenden die Prozesse in der Weise erklärt, wie sie dort vonstattengehen.

Diese Anlage ist mit einer vorgeschalteten Denitrifikation ausgestattet, weshalb die Ammoniumverbindungen aus dem Zulauf zunächst unverändert in die Nitrifikation gelangen, welche durch autotrophe Bakterien erfolgt (DWA, 2016). Im Gegensatz zu der Darstellung in der folgenden Abb. 5, S. 16 geht die externe Rezirkulation der Pilotanlage in Stahnsdorf ins Denitrifikationsbecken.

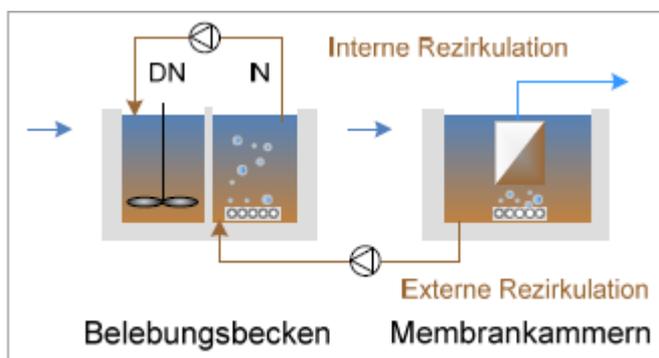


Abb. 5: Fließschema eines MBR mit vorgeschalteter Denitrifikation (Krebber, 2013)

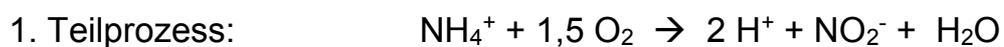
Als erstes wird das Ammonium, das durch den Zulauf der Kläranlage über die Denitrifikation der Nitrifikation zugeführt wird, durch nitrifizierende Bakterien (*Nitrosomonas*) zu Nitrit und schließlich durch *Nitrobacter* zu Nitrat oxidiert (Pütz, 2012). Die Bakterien, die für die Nitrifikation zuständig sind, haben nur einen Atmungsstoffwechsel mit molekularem Sauerstoff, werden dementsprechend als obligate Aerobionten oder Nitrifikanten bezeichnet. Die Sauerstoffversorgung spielt somit eine bedeutende Rolle, die mit Hilfe von Belüftungseinrichtungen sichergestellt wird (Gujer, 2007). Das von den Bakterien produzierte Nitrat wird dann in den Zulauf der Denitrifikation zurückgeführt und durch anaerobe heterotrophe Bakterien zu molekularem Stickstoff reduziert. Damit dieser Prozess stattfinden kann, darf kein gelöster Sauerstoff im Wasser vorhanden sein und zusätzlich wird Kohlenstoff benötigt. Ist dieser nicht ausreichend vorhanden, muss er zugeführt werden (S. Baumgarten, 2007). Der Prozess der Denitrifikation wird als anaerobe Atmung oder auch Nitratatmung bezeichnet (Förstner & Köster, 2018).

Im Folgenden sind die Prozesse noch einmal mit Hilfe von Reaktionsgleichungen verdeutlicht.

- Denitrifikation:



- Nitrifikation:



Die Gleichungen zeigen, dass bei der Denitrifikation Nitrat und Hydroxid-Ionen zu gasförmigen Stickstoff, Sauerstoff und Wasser reagieren. Die Nitrifikation teilt sich in zwei Teilprozesse auf. Beim ersten Teilprozess scheiden die Bakterien bei der Oxidation von Ammonium-Ionen mit Sauerstoff Nitrit, Säure und Wasser aus. Im zweiten Schritt wird dann das gebildete Nitrit mit Sauerstoff zu Nitrat umgewandelt. Die beiden Teilprozesse in Summe betrachtet, sagen aus, dass Ammonium-Ionen und Sauerstoff zu Nitrat, Säure und Wasser reagieren (Masch, 2020).

Es gibt verschiedene Möglichkeiten der Steuer- und Regelmöglichkeiten für die Denitrifikation und Nitrifikation. Einerseits kann die Größe des Denitrifikations- bzw. Nitrifikationsteiles verändert werden (Volumenaufteilung) (DWA, 2016). Andererseits kann durch die Sauerstoffzufuhr und die Zugabe externer C-Quellen gesteuert und geregelt werden. Durch Kohlenstoffzugabe in der Denitrifikation kann das Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff verbessert werden. Dies ist wichtig für das Wachstum der Denitrifikanten (Grabl, 1998). Des Weiteren hat auch die Rezirkulation einen Einfluss auf die ablaufenden Steuer- und Regelprozesse. Sie ist eine Stellgröße der Denitrifikation. Sie kann in Abhängigkeit des Zuflusses und des Nitratgehaltes im Ablauf gesteuert werden (Schönberger, 2003). Bei einer Anlage mit vorgeschalteter Denitrifikation, würde ohne Rezirkulation das abgebaute Ammonium, also das Nitrat, direkt in den Ablauf gelangen und nicht in die Denitrifikation, was negative Folgen für die Umwelt hätte. Im normalen Betrieb

wird nur ein Teil des Nitrats aus der Nitrifikation im Denitrifikationsbecken umgewandelt, weil nur ein Teil rezirkuliert wird. Dort finden die Prozesse unter anoxischen Bedingungen statt (DWA, 2016).

Folgend werden weitere wichtige Parameter betrachtet, die regelmäßig berechnet werden sollten. So ist es wichtig, das Schlammalter zu bestimmen, um festzustellen, ob die für die biologische Reinigung verantwortlichen Bakterien genügend Zeit haben, um sich zu vermehren. Dafür muss ein Mindestschlammalter eingehalten werden. In der betrachteten Pilotanlage liegt das Optimum des Schlammalters bei 20–30 Tagen. Das Schlammalter stellt die mittlere Schlammverweilzeit im Belebungsbecken dar. Bei der Berechnung des Schlammalters wird die im Belebungsbecken vorhandene TS-Masse [kg] durch die täglich abgehende TS-Masse [kg/d] geteilt, die sich aus dem abgezogenen Überschussschlamm und dem Schwebstoffgehalt im Ablauf der Nachklärung zusammensetzt. Somit gilt, dass sich mit der Änderung der Trockensubstanz auch das Schlammalter ändert. Die Formel (4) sieht wie folgt aus (Krebber, 2013):

$$\text{Schlammalter } t_{\text{TS}} = \frac{V_{\text{BB}} \cdot \text{TS}_{\text{BB}}}{Q_{\text{ÜS,d}} \cdot \text{TS}_{\text{ÜS}} + Q_{\text{d}} \cdot X_{\text{TS,AN}}} \quad (4)$$

Volumen des Belebungsbeckens V_{BB} [m³]

Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken TS_{BB} $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

Trockensubstanzgehalt im Überschussschlamm $\text{TS}_{\text{ÜS}}$ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

Täglicher Überschussschlammabzug $Q_{\text{ÜS,d}}$ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right]$

Abfiltrierbare Stoffe im Ablauf Nachklärung $X_{\text{TS,AN}}$ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

Täglicher Abwasserzufluss/-abfluss Q_{d} $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right]$

Die CSB-Schlammbelastung ist ein Maß für die individuelle Ernährungslage der Belebtschlammorganismen. Sie wird mit der folgenden Formel (5) berechnet:

$$B_{\text{TS}} = \frac{\text{CSB}}{\text{Volumen}_{\text{BB}} \cdot \text{TS-Gehalt}_{\text{BB}}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg} \cdot \text{d}}\right] \quad (5)$$

Der Zusammenhang zwischen Schlammalter und Schlammbelastung besteht darin, dass ein hohes Schlammalter eine niedrige Schlammbelastung impliziert und umgekehrt (Sölter & Schulz, 2020).

Und ein weiterer wichtiger Parameter, der berechnet werden muss, ist die CSB-Raubelastung, welche die Belastung des Anlagenvolumens beschreibt. Sie kann mit der folgenden Formel (6) (DWA, o.D.) ermittelt werden:

$$B_R = \frac{CSB_{Zulauf}}{V_R} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}} \right] \quad (6)$$

Die Raumbelastung wird berechnet mit der Zulaufkonzentration an CSB durch das Reaktorvolumen. Bei der Berechnung ist zu beachten, dass sich das Reaktorvolumen in der Pilotanlage zusammensetzt aus dem Volumen des Membrantanks und dem Volumen des Belebungsbeckens.

2.3. Vor- und Nachteile der Membranfiltrationstechnologie

Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile der Membranfiltrationstechnik betrachtet.

Zu den Vorteilen gehört der geringere Platzbedarf, da keine Nachklärung notwendig ist und schon vorhandene Anlagenkomponenten beim Ausbau von Anlagen mitgenutzt werden können (Drensla & Janot, 2015). Da in den Membranbereichen verstärkt Sauerstoff eingetragen wird, werden vermehrt auch oxidierbare Abwasserinhaltsstoffe oxidiert (Grinwis, 2008). Die Größe der Belebungsbecken kann bis auf ein Viertel des Volumens einer konventionellen Anlage reduziert werden, da diese mit einer mindestens vierfach höheren Trockensubstanz von bis zu $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ betrieben werden können (Pinnekamp & Friedrich, 2003).

Überdies werden durch die Membranen Partikel nahezu vollständig zurückgehalten, wodurch die CSB-Belastung im Kläranlagenablauf stark reduziert wird. Dies führt auch zu einer Reduzierung der Keimbelastung, da die Bakterien am Schlamm anhaften. Durch diesen Bakterien- und Virenrückhalt gilt der Ablauf als hygienisch unbedenklich und kann in empfindliche Gewässer eingeleitet oder als Trinkwasserressource verwendet werden (Drensla, 2015). Daraus lässt sich schließen, dass die Ablaufqualität durch den MBR besser ist im Vergleich zu konventionellen Verfahren.

Im Gegensatz dazu existieren aber auch Nachteile. Der Stromverbrauch eines

kommunalen MBR kann bis um ein Vierfaches höher als der einer konventionellen Kläranlage sein. Die Belüftung des Membranbioreaktors macht mehr als 50 % des Energieverbrauchs aus, wodurch hohe Betriebskosten entstehen. Der mittlere spezifische Energieverbrauch von MBR-Anlage liegt zwischen 0,73 (MBR Seelscheid) und 1,83 kWh·m⁻³ (MBR Xanten-Vynen), der mittlere einwohnerspezifische Stromverbrauch bei 49 bis 175 kWh·(E·a)⁻¹ (Krebber, 2013). Moderne konventionelle Kläranlagen hingegen verbrauchen zwischen 20 und 45 kWh·(E·a)⁻¹ (Förstner & Köster, 2018).

Die Abbildung 6 verdeutlicht den hohen Stromverbrauch der Belüftung der Membranen am Beispiel des MBRs Nordkanal.

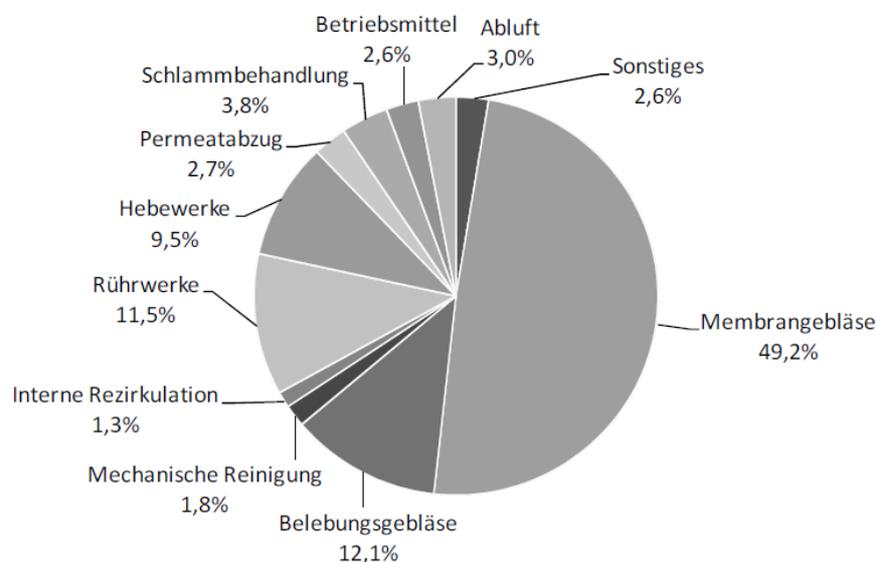


Abb. 6: Verteilung des Stromverbrauchs des MBR Nordkanal (Krebber, 2013)

Es kommt weiterhin zu höheren Betriebskosten als bei einer konventionellen Kläranlage, da hierbei mit einer höheren Schlammkonzentration gearbeitet wird, wodurch die Mikroorganismen mehr Sauerstoff benötigen. Der Mehrverbrauch an Energie resultiert vor allem aus der Belüftung der Membranen, um der Deckschichtbildung vorzubeugen (Krebber, 2013). Da die MBR-Technik aber meist technisch aufwendiger ist, wird geschultes Personal benötigt (Drensla & Janot, 2015). Durch ein geringeres Beckenvolumen sind sie Prinzipbedingt etwas anfälliger für Stoßbelastungen. Hinzu kommt, dass schon zu Beginn ein zusätzlicher Aufwand betrieben werden muss für eine sorgfältige Vorreinigung, um Verstopfungen und Verblockungen zu verhindern und auch sonst regelmäßig Mehraufwand erforderlich ist, z.B. aufgrund von chemischen Reinigungen, da bei

der Membranfiltrationstechnik das Biofouling unvermeidbar ist und dadurch die Reinigungsleistung der Membranen verschlechtert wird. Für die verwendeten Chemikalien sind schließlich auch Chemikalienlager notwendig (Pinnekamp & Friedrich, 2003).

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass ein geringerer Platzbedarf und eine hohe Reinigungsleistung, die das Wasser bis zur Brauchwasserqualität reinigt, mit höheren Betriebskosten einhergehen, die vor allem durch einen höheren Energiebedarf aufgrund der Belüftung der Membranen entstehen.

3. Energetische Optimierung der Belüftung der MBR-Anlage

3.1. Optimale Belüftungsregelung durch Sauerstoff-Messung

Um die Sauerstoffzufuhr zu regeln, können verschiedene Regler eingesetzt werden. Während der sauerstoffbasierten Regelung wurde in der Pilotanlage der PID-Regler, der sogenannte Sauerstoffregler, eingesetzt. Dies ist ein Regler mit einem proportionalen, integralen und differenzierenden Verhalten. Dieser Regler erfasst die Differenz zwischen einem Sollwert und der Prozessvariablen, wodurch kontinuierlich ein Fehlerwert ermittelt wird (Uprety et al., 2015). Explizit erläutert, misst der Proportionalteil P die Abweichung zwischen dem Soll- und dem Istwert, welche mit einem Verstärkungsfaktor multipliziert wird. Der Integralteil I ist eine Erweiterung des Proportionalteils. Dieser wirkt langfristig und greift, wenn der Proportionalteil nicht ausreichend wirkt. Der Differenzialteil D reagiert, wenn es Veränderungen des IST-Wertes gibt (Bate, 2009).

In einer MBR-Anlage existieren zwei Orte an denen eine Belüftung eingesetzt wird. Zum einen benötigen die in der Nitrifikation eingesetzten Bakterien Sauerstoff, weshalb die Belebung belüftet werden muss (Barfüßer, 2018) und zum anderen müssen die Membranen belüftet werden. Da die Belüftung den größten Energieverbrauch beim Reinigungsprozess ausmacht, besteht großes Optimierungspotenzial.

Für Plattenmodule wurden die sogenannten Doppeldecker entwickelt, bei dem sich zwei Module übereinander befinden. Damit wird die doppelte Membranfläche mit der gleichen Luftmenge belüftet.

Außerdem kann durch das Air-Cycling bei der Membranbelüftung Energie eingespart werden, da hierbei, je nachdem wie die Zeitintervalle eingestellt sind, beispielsweise den beiden Anschlüssen der Module abwechselnd alle 30 Sekunden Luft zugeleitet werden. Dadurch wird die benötigte Luftmenge halbiert (Krebber, 2013). Von Nachteil ist aber, dass durch die geringere Belüftung der Membranen das Fouling und Scaling begünstigt wird.

Sowohl für MBRs als auch konventionelle Kläranlagen ist zutreffend, dass unterschiedliche Belüftungen entwickelt und eingesetzt werden. Grundlegend ist das Prinzip der intermittierenden Belüftung mit regelmäßigen Belüftungs- und

Pausenzeiten. Durch die Optimierung der Belüftung wird versucht, den Sauerstoffbedarf der Bakterien besser decken zu können. Dadurch, dass die Gebläse nur bei Bedarf aktiviert werden, wird die Effizienz gesteigert und Energiekosten werden reduziert. Die Regelung der Belüftung kann auf verschiedenen Parametern basieren: dem gelösten Sauerstoff, Redoxpotenzial, der Ammonium- und Nitratkonzentration.

Die Regelung, basierend auf den Sauerstoffwerten, ist sehr gebräuchlich. Bei der Sauerstoff-basierten Regelung ist der Sauerstoffwert sowohl die Mess- als auch die Stellgröße. Hierbei wird dieser in der Nitrifikation gemessen und anhand dieses ermittelten Wertes und eines eingestellten Sollwertes die Sauerstoffzufuhr angepasst. Hohe Sauerstoffkonzentrationen fördern die Nitrifikation, aber dieser Effekt nimmt ab, wenn der Sauerstoffwert $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ überschreitet. Ein höherer Sauerstoffwert führt nur noch zu einer Erhöhung des Energiebedarfs der Belüftung. (Dr. Alex et al., 2017). Bei dieser Regelung werden allerdings keine weiteren Daten berücksichtigt, wie z. B. die Ammonium- und Nitratkonzentration, weshalb im Folgenden die Ammonium-basierte Regelung genauer betrachtet wird.

3.2. Optimierung der Belüftung durch Ammonium-basierte Regelung

Die relevanten Größen, die bei dieser Regelung gemessen werden müssen, sind die Sauerstoff- sowie die Ammoniumkonzentration, wobei die Sauerstoffzufuhr die Stellgröße ist (Lindtner, 2007). Die Besonderheit der Ammonium-basierten Regelung liegt darin, dass ein fester Sollwert für den verwendeten Sauerstoff eingestellt wird und damit die aeroben und anoxischen Phasen der Ammoniumkonzentration angepasst werden (Regmi et al., 2015). Es wird unterschieden, ob der Sauerstoffsollwert nach der Ammonium-Konzentration im Belebungsbecken, Ablauf oder auch dem Zulauf geregelt wird, das heißt, dass die Regelung nach dem „feedback control“- und die Steuerung nach dem „feedforward control“-Prinzip ablaufen. Unter „feedback control“ wird verstanden, dass der Istwert am Ende der Regelstrecke (Ablauf) gemessen und mit dem Sollwert verglichen wird und auf dieser Grundlage die Parameter verändert werden. „feedforward control“ überprüft zuerst die Störgröße und versucht, deren Auswirkungen vorausschauend unwirksam zu machen (Londong, 2020). Diese Prinzipien verdeutlicht Abb. 7, S.24.

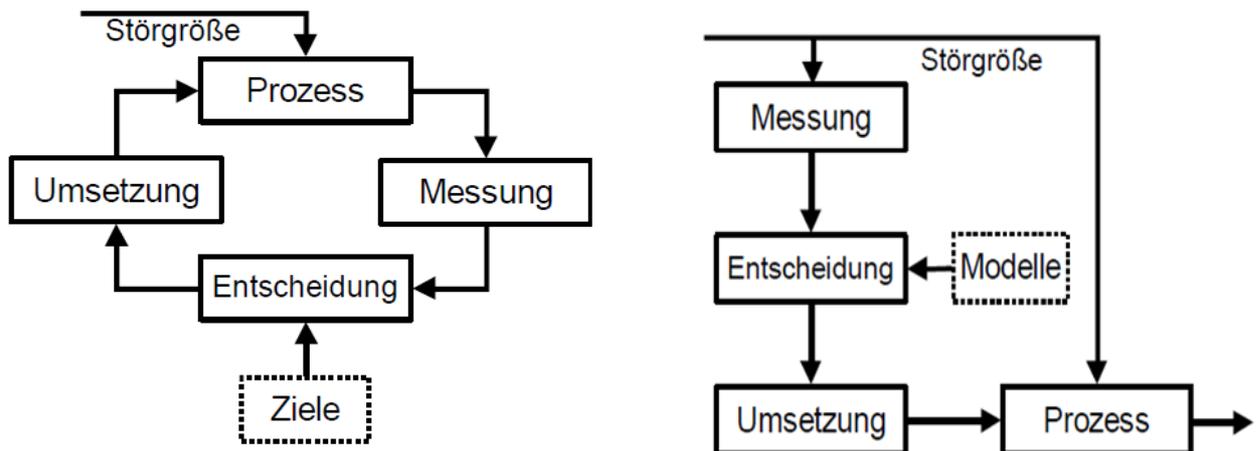


Abb. 7: Regel- und Steuersystem (Olsson & Newell, 1999)

Die Ammonium-basierte Regelung fördert den Betrieb bei niedrigen Sauerstoffkonzentrationen. Es wird hierbei der Sauerstoffsollwert so eingestellt, dass der vorher festgelegte Ammonium-Wert im Ablauf eingehalten wird. Mit dieser Regelung wird bezweckt, dass der O_2 -Sollwert bei lastschwächeren Zeiten abgesenkt und somit Energie eingespart wird. Damit bei höherer Belastung die Ammoniumwerte im Ablauf nicht zu stark ansteigen, wird dann die Belüftung verstärkt (Dr. Alex et al., 2017). Damit wird erreicht, dass der Gesamtenergiebedarf der Anlage gesenkt wird, aber trotzdem die Ablaufqualität beibehalten wird. Da die Belüftung den größten Anteil der Betriebskosten einer Kläranlage ausmacht, ist es von Bedeutung, diese zu senken.

In Studien wurde bereits belegt, dass die Nitrifikation auch bei niedrigen Sauerstoffwerten stattfinden kann. Wenn statt $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ $0,5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Sauerstoff eingesetzt werden, führt das zu einer Energieeinsparung von 10 % in der Kläranlage (Medinilla et al., 2020).

Allerdings muss für diese Regelung entsprechende Messtechnik beschafft werden.

Abb. 8, S. 25 zeigt, wie die Belüftung beispielhaft in einer Kläranlage bei verschiedenen Regelungen ablaufen würde.

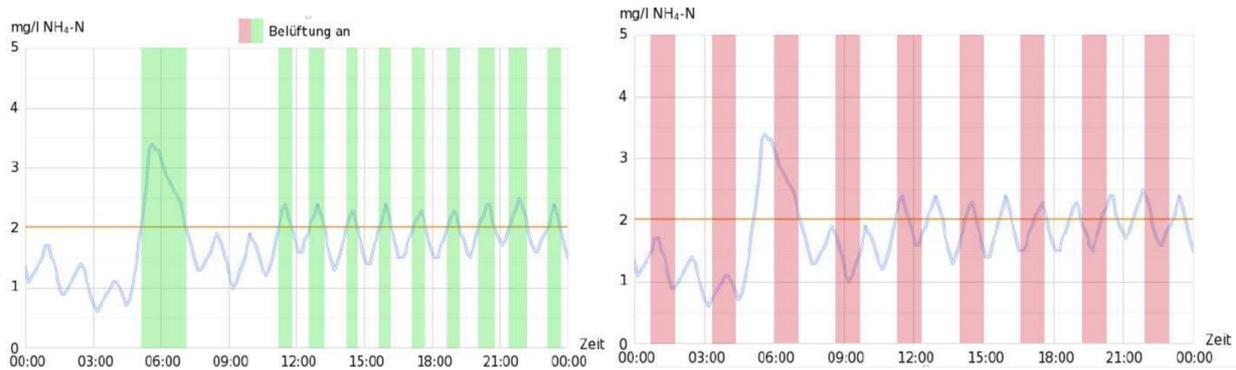


Abb. 8: Vergleich der Belüftung, basierend auf der Ammoniummessung (links) und einer regelmäßig periodischen Belüftung (rechts) (Barfüßer, 2018)

Es kann deutlich gemacht werden, warum eine Ammonium-basierte Belüftung Vorteile aufweist gegenüber einer regelmäßigen periodischen Belüftung. Links zeigt die Anpassung der Belüftung auf die Ammoniumwerte, rechts die regelmäßige periodische Belüftung ohne Anpassung an die bestehende Ammoniumkonzentration. Um sechs Uhr gab es bei der betrachteten Kläranlage eine besonders hohe Konzentration von Ammonium. Hier zeigt sich, dass die periodische Belüftung zu spät mit dem Sauerstoffeintrag beginnen und somit ein Teil des Ammoniums nicht abgebaut werden würde und somit schlechtere Ablaufwerte erzielt würden. Die Ammonium-basierte Belüftung hingegen deckt den Peak vollständig ab.

Somit ist es sinnvoll, die Ammonium-basierte Regelung einzusetzen, wenn in der Anlage unregelmäßige Schwankungen der Ammoniumkonzentration vorhanden sind, um sichere Ablaufqualität zu erreichen.

3.3. Energetische Optimierung der Membrananlage Nordkanal

Die Membranbelebungsanlage Nordkanal befindet sich im Westen Deutschlands und zählt zu den größten Europas. Die Anlage ist für die Reinigung des Abwassers von 80.000 EW ausgelegt (Krebber, 2013). Ein Fließschema der Anlage zeigt Abb. 9, S. 26.

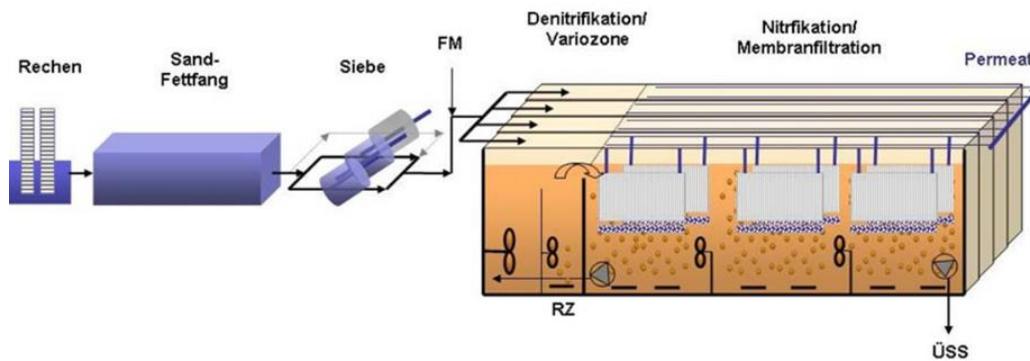


Abb. 9: Fließschema des MBR Nordkanal (Drensla et al, 2015)

Das Abwasser durchläuft zunächst einen Feinrechen mit einem Stababstand von 5 mm, um anschließend einen Sand- und Fettfang zu passieren. Es folgen Siebe mit einer Maschenweite von 1,5 mm und anschließend die Belebung. In dieser Belebung mit einer vorgeschalteten Denitrifikation befinden sich vier Straßen mit jeweils zwei Filtrationslinien, diese wiederum mit jeweils 24 Membranmodulen. Dies ergibt insgesamt eine Filterfläche von 84.000 m² und eine Abwassermenge von 45.000 m³·d⁻¹. Es handelt sich mit einer Porengröße von 0,04 µm um eine Ultrafiltration.

In dieser Anlage wurden mehrere Maßnahmen zur energetischen Optimierung ergriffen. So wurde die Taktung der Cross-Flow-Belüftung auf 30/10 (Pause/Puls) geändert, davor betrug sowohl die Pause als auch die Belüftungszeit 10 Sekunden. Die Überschussschlammmentnahme und Schlammmentwässerung wurden optimiert, die Frequenzumformer bei Rührwerken, Membrangebläsen und Sandfanggebläse nachgerüstet, die Gebläse für die Nitrifikationsbecken ausgetauscht, die Belüftungsregelung umgestellt und der maximale Membranflux von 25 L·m⁻²·h⁻¹ auf 40 L·m⁻²·h⁻¹ gesteigert.

Die Belüftung wird im Nordkanal mit Hilfe der O₂-Sonde gesteuert.

Als eine der Energiesparmaßnahmen wurde in der Anlage ein anaerober Fermenter eingesetzt, statt einer energieaufwändigeren aeroben Stabilisierung.

Durch diese verschiedenen Maßnahmen wurden 2015 im Vergleich zu 2009 in der Anlage Nordkanal statt 5,5 kWh nur 3,1 kWh verbraucht.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der MBR Nordkanal die Ablaufgrenzwerte bei weitem unterschreitet und der spezifische Energieverbrauch durch Optimierungen auf unter $0,6 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ gesenkt werden konnte (Drensla & Janot, 2015).

4. Material und Methode

4.1. MBR-Pilotanlage

In Abbildung 10 ist ein vereinfachtes Fließschema der Pilotanlage in Stahnsdorf zu sehen. Die grünen und orangefarbenen Punkte repräsentieren hierbei die für die Abwasserbehandlung relevanten Größen, die mit Hilfe von eingebauter Messtechnik ermittelt werden. Abbildung 11, S. 29 zeigt den Innenraum des Containers, in dem sich die Pilotanlage befindet.

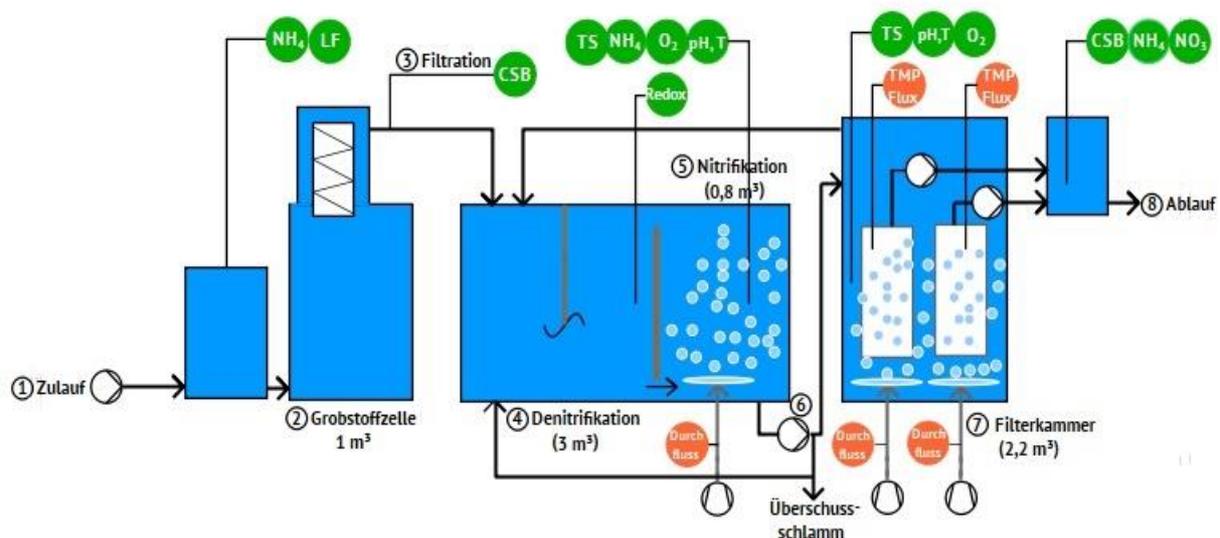


Abb. 10: Vereinfachtes Fließschema der Pilotanlage in Stahnsdorf

Bevor das Abwasser der Vorklärung des Klärwerks Stahnsdorf entnommen wird, wurde es bereits durch eine Rechenanlage, einen Sandfang und die Vorklärung bereinigt. Von dort wird das vorbehandelte Abwasser für den Zulauf (Abb. 2 (①)) der Pilotanlage durch eine Pumpe entnommen. Im Zulauf werden mit Hilfe von Online-Sonden zum einen die Ammonium-Konzentration und zum anderen die Leitfähigkeit gemessen. Folgend findet in der Grobstoffzelle (Abb. 2 (②)) die mechanische Vorreinigung statt, in der die nicht im Wasser aufgelösten Stoffe, wie zum Beispiel Fasern oder andere unhygienische Grobstoffe, die kleiner als 1 mm sind, mit dem Feinrechen aus dem Abwasser geholt werden. Anschließend wird ein Teil des Abwassers durch eine kleine Filtrationseinheit, den Filtrax (Abb.2 (③)), erneut filtriert. Nach dem Filtrax wird der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) mit Hilfe der TriOS-Sonde gemessen. Es folgt die biologische Reinigungsstufe, in der Bakterien und Kleinstlebewesen daran arbeiten, die gelösten Abwasserverschmutzungen abzubauen. Der Hauptteil des Abwassers fließt

folgend in das Denitrifikationsbecken (Abb. 2 (④)), wobei es sich in dieser Anlage um eine vorgeschaltete Denitrifikation (Verweis Kapitel 2.2) handelt. In der Denitrifikation wird das Redoxpotenzial gemessen. Von dort gelangt das Abwasser weiter in die Nitrifikation (Abb. 2 (⑤)), in der die Trockensubstanz, der Ammonium- und der Sauerstoffgehalt, der pH-Wert und die Temperatur ermittelt werden. Eine Extra-Pumpe, die Rezirkulationspumpe (Abb. 2 (⑥)), sorgt dafür, dass ein Teil als Überschussschlamm abgeführt, ein Teil zur Denitrifikation und ein Teil weiter zur Filterkammer, oder auch als Membrantank bezeichnet, geleitet wird.



Abb. 11: Innenraum des Containers, in dem sich die Pilotanlage befindet (links) und Blick auf den Filtrationstank (rechts)

In dieser Filterkammer ⑦ befinden sich zwei Membraneinheiten. Mit Hilfe dieser Membranen werden schließlich Stoffe wie Belebtschlamm, Bakterien und Viren herausgefiltert. Diese zwei Membraneinheiten sind unterschiedliche Membrantypen, jeweils mit zwei übereinander angeordneten Membranmodulen vom Typ Ultrafiltration. Jedes Modul verfügt über 12,5 m² Membranfläche. Die genauen Membrandaten sind in Tabelle 3, S. 30 aufgeführt.

Tab. 3: Membrandaten der MBR-Pilotanlage

	Membraneinheit 1	Membraneinheit 2
Hersteller	Martin Systems	Martin Systems
Typ	CUBE®PES1	CUBE®PVDF
Bauform	Plattenmodul	Plattenmodul
Membranwerkstoff	Polyethersulfone (PES)	Polyvinylidene Fluoride (PVDF)
Porengröße	35 – 100 nm	30 – 50 nm
Gesamtoberfläche	25 m ²	25 m ²
Permeabilität (klares Wasser)	≥ 285 L/m ² .h.bar	1600 L/m ² .h.bar

Die Plattenmodule der Martin Systems AG befinden sich auf einem Gittergerüst mit offener Gitterstruktur. Es handelt sich hierbei um synthetische Polymere Flachmembranen mit einer nominalen Porengröße von 35 nm, was der Ultrafiltration entspricht. Die Belüftung ist unter den Modulen angeordnet, wodurch ein turbulentes Luft-/Wassergemisch entsteht, das quer zu den Platten aufsteigt. Dadurch werden Partikel permanent abgetragen, was verhindert, dass sie sich auf der Membranoberfläche absetzen. Das wird als Cross-Flow-Betrieb bezeichnet (siehe Kapitel 2.1). Die Membranen haben eine Gesamtoberfläche von 25 m² (MARTIN Membrane Systems AG, 2015). Außerdem werden im Membrantank der Transmembrandruck und der Durchfluss ermittelt, ebenso wie die Trockensubstanz, der pH-Wert, die Temperatur und der Sauerstoffgehalt. Schließlich wird das Permeat vom Membrantank weiter in den Ablauf (Abb.10 (©)) geleitet, in dem der CSB sowie der Ammonium- und Nitratgehalt gemessen werden.

4.2. Standort und verwendetes Abwasser

Die Tabelle 4, S. 31 weist die Abwasserzusammensetzung des verwendeten Abwassers auf. Dies wurde bis zur Umsetzung der Pumpe am 03.06.2021 direkt der Vorklärung und danach nach der Vorklärung entnommen.

Tab. 4: Abwasserzusammensetzung des verwendeten Abwassers

Entnahme Zulauf	CSB unfiltr. [mg·L ⁻¹]	Standardabweichung	CSB filtr.	Standardabweichung	NH ₄ -N	Standardabweichung
Vorklärung	1313,8 (30)	401,6	/	/	68,41 (11)	5,47
Nach der Vorklärung	667,8 (73)	112,1	266,2 (20)	59,7	65,78 (60)	7,5

Es wurden jeweils die Mittelwerte aller Laborwerte des gesamten Versuchszeitraums bis zum 20.12.2021 um 11 Uhr verwendet. Die Zahlen in den Klammern entsprechen der Anzahl an verwendeten Daten (z.B. n = 20). Für die Berechnung der Werte wurden die Werte der Nachweisgrenze eingesetzt, falls die gemessenen Werte unter der Bestimmungsgrenze lagen. So wird auch im weiteren Verlauf der Arbeit bei der Berechnung der Werte vorgegangen.

4.3. Verwendete Messtechnik in der Pilotanlage

Die folgende Tabelle 5 zeigt auf, mit welchen Wasserqualitätsmessungen die für die Fragestellung relevanten Parameter gemessen wurden. Die Messungen sind notwendig, um eine optimale Betriebsführung gewährleisten zu können.

Tab. 5: Auflistung der verwendeten Qualitätsmessung

Parameter	Sensor	Hersteller	Messbereich min-max	Messgenauigkeit	Messprinzip	Gemäß Standardmethode (DIN)	Einbauort
Ammonium	AISE sc Sonde	HACH	0 bis 1000 mg·L ⁻¹ [NH ₄ -N] 0 bis 1000 mg·L ⁻¹ [K ⁺]	5% des gemessenen Wertes + 0,2 mgL ⁻¹	Potentiometrische Messung mittels Ionenselektive Elektroden (ISE)	DIN 38405	Zulauf Nitrifikation

Ammonium und Nitrat	AN-ISE sc Sonde	HACH	0 bis 1000 mgL ⁻¹ [NH ₄ -N] 0 bis 1000 mg·L ⁻¹ [K ⁺]	5% des gemessenen Wertes + 0,2 mgL ⁻¹	Potentiometrische Messung mittels Ionenselektive Elektroden (ISE)	DIN 38405	Ablauf
gelöster Sauerstoff	LDO sc Prozesssonde	HACH	0 bis 20 ppm (0 bis 20 mg·L ⁻¹)	unter 5 ppm: ± 0,1 ppm über 5 ppm: ± 0,2 ppm	Lumineszenzverfahren	E DIN ISO 17289: 2013-12	Nitrifikation Filtration
CSB	OPUS Tauchsensor	TriOS	0 bis 2200 mgL ⁻¹ (Pfad 1 mm) 0 bis 220 mg·L ⁻¹ (Pfad 10 mm)	keine Angabe	Absorption Spektralanalyse	DIN 38 409-H 41	nach Filtrax Ablauf

4.3.1. Messung der Parameter Ammonium und Nitrat

Für die kontinuierliche Messung von Ammonium und/oder Nitrat direkt im Becken werden die ISE-Sonden eingesetzt. ISE steht für „ionenselektive Elektrode“, mit welcher die Messung nach dem Verfahren der Potentiometrie erfolgt (Tränkler & Reindl, 2014). Die Elektrode besteht aus einer Mess- und einer Referenzelektrode und besitzt eine Membran, die nur das ausgewählte Ion bindet. Dadurch entsteht an der Membranoberfläche ein ionenspezifisches Potenzial. Beide Elektroden liefern ein Potenzial, wobei das der Referenzelektrode bekannt und konstant ist. Das der Messelektrode ist abhängig von der Konzentration des Ions. Somit gilt, dass sich das Potenzial ändert, sobald sich die Ionenkonzentration ändert.

Die ANISE sc Sonde, welche im Ablauf der Pilotanlage eingesetzt wird, misst die Ammonium- und Nitratkonzentrationen. Bei der Ammonium-Messung kann es dabei zu Störungen durch Kalium und bei der Nitrat-Messung durch Chlorid kommen. Dies wird durch geeignete Elektroden ausgeglichen. Die Potentialdifferenz zwischen den Elektroden gibt schließlich proportional die Aktivität der Ionen der Messlösung wieder.

In der Pilotanlage wird des Weiteren die AISE sc Sonde zur Bestimmung der Ammoniumkonzentration im Zulauf und der Nitrifikation eingesetzt (HACH Company/HACH Lange GmbH, 2018).

4.3.2. Messung des gelösten Sauerstoffs

Darüber hinaus kommt für die Messung des gelösten Sauerstoffs die LDO sc Prozess-Sonde zum Einsatz, welche sowohl in der Nitrifikation als auch der Filtration eingebaut ist. Sie funktioniert mittels optischen Lumineszenz-Verfahrens. Dies ist ein optisches Messverfahren bei dem pulsierendes, blaues Licht von der Sonde ausgesendet wird und auf einen Luminophor trifft, der sich in der Sensorkappe befindet. Der Luminophor ist ein Leuchtstoff, der nach der Anregung durch das Licht, Licht aussendet. Dies bedeutet, dass die Elektronen des Luminophors durch die Lichtimpulse in einen angeregten Zustand versetzt werden. Dieses höhere Energieniveau wird innerhalb von Mikrosekunden wieder verlassen und die Energiedifferenz in Form von roter Strahlung emittiert. Vorhandene Sauerstoffmoleküle, die mit dem Luminophor zusammenstoßen, sorgen zum einen dafür, dass die rote emittierte Strahlung kurzlebiger wird und zum anderen dafür, dass sie weniger intensiv ist, da das höhere Energieniveau schneller und ohne Aussendung von Strahlung verlassen wird. Um die Sauerstoffkonzentration zu bestimmen, muss die Lebensdauer τ der roten Strahlung ermittelt werden. Diese ist definiert „die Dauer zwischen Anregung und einem Rückgang der roten Strahlung auf das $1/e$ -fache der maximalen Intensität“, (Häck, o.D.). Das Prinzip der Aus- und Rücksendung der Strahlung ist in Abbildung 12 verdeutlicht.

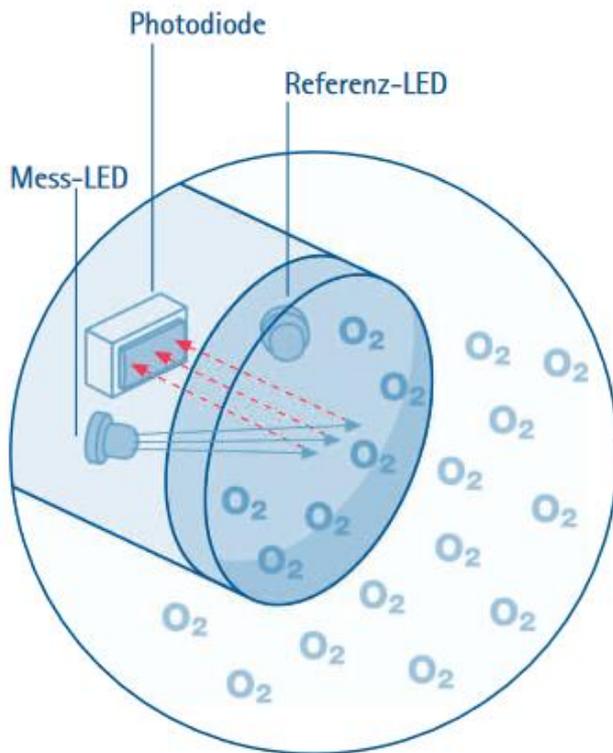


Abb. 12: Funktionsweise des Lumineszenzverfahrens

(HACH Company/HACH Lange GmbH, 2017)

4.3.3. Messung der Stickstoff- und Kohlenstoffverbindungen

Der OPUS Tauchsensoren kann die Stickstoff- und Kohlenstoffverbindungen messen. Dieser funktioniert mittels einer optischen Messung. Dafür durchquert das von einer Lichtquelle ausgesandte Licht einen optischen Pfad und wird teilweise vom Medium, in dem sich der Sensor befindet, absorbiert. Dahinter folgt ein Spektrometer, das das verbleibende Licht aufnimmt und die Intensität bei verschiedenen Wellenlängen bestimmt (siehe Abbildung 13). Hierbei wird die Lichtschwächung, die das gemessene Medium verursacht, mit der von ultrareinem Wasser verglichen. Schließlich lässt sich durch Berechnungen die Absorption bestimmen und durch eine Spektralanalyse kann anschließend mit Hilfe einer integrierten Analysesoftware ermittelt werden, zu welchem gespeicherten Absorptionsspektrum das gemessene am besten passt, um so zu identifizieren, um welche Substanz es sich handelt. Die Funktionsweise der optischen Messung wird in Abbildung 13, S. 35 verdeutlicht. Dieser Sensor befindet sich zum einen nach dem Filtrax und zum anderen im Permeat (Heuermann, 2017).

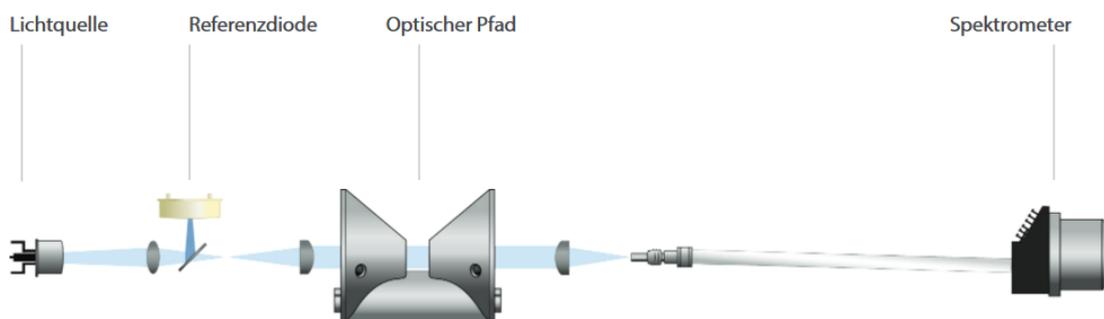


Abb. 13: Funktionsweise der optischen Messung (Heuermann, 2017)

4.4. Kalibrierung, Wartung und Inspektion der Messgeräte

Um gewährleisten zu können, dass die Messgeräte verlässlich Daten messen, müssen sie regelmäßig gereinigt, kalibriert und inspiziert werden. Die jeweiligen Intervalle, wie sie in der Pilotanlage durchgeführt wurden, sind in der Tabelle 6 aufgelistet.

Tab. 6: Reinigungs-, Kalibrierungs- und Überprüfungszyklen der jeweiligen Sonden

Sonde	Reinigung	Kalibrierung	Sensor auf Schäden prüfen
ISE- Sonden	monatlich	bei Bedarf	monatlich
LDO sc Prozesssonde	monatlich	alle 3 Monate	monatlich
OPUS Tauchsensoren	monatlich	gar nicht	monatlich

Es wird nun näher auf die Kalibrierungen eingegangen. Bei dieser wird ein Zusammenhang hergestellt zwischen der gemessenen Größe und der Sollgröße.

Für die Kalibrierung der ISE-Sonden gibt es unterschiedliche Möglichkeiten.

Die erste Kalibrierung sollte hierbei erst durchgeführt werden, nachdem sich der Sensor mindestens 12 Stunden in der Abwassermatrix befunden hat. Es gilt, dass als erste Korrektur immer die 1-Wertkorrektur und als zweite Korrektur die 2-Wertkorrektur (siehe Abb. 14) durchgeführt wird. Im ersten Fall werden nur ein Laborwert und der gemessene Wert der Sonde benötigt. Im zweiten Fall werden jeweils zwei Werte benötigt. Am häufigsten wird die Matrix1-Korrektur verwendet, durch welche Einflüsse anderer Ionen auf die ISE-Elektrode kompensiert werden (HACH Company/HACH Lange GmbH, 2018).

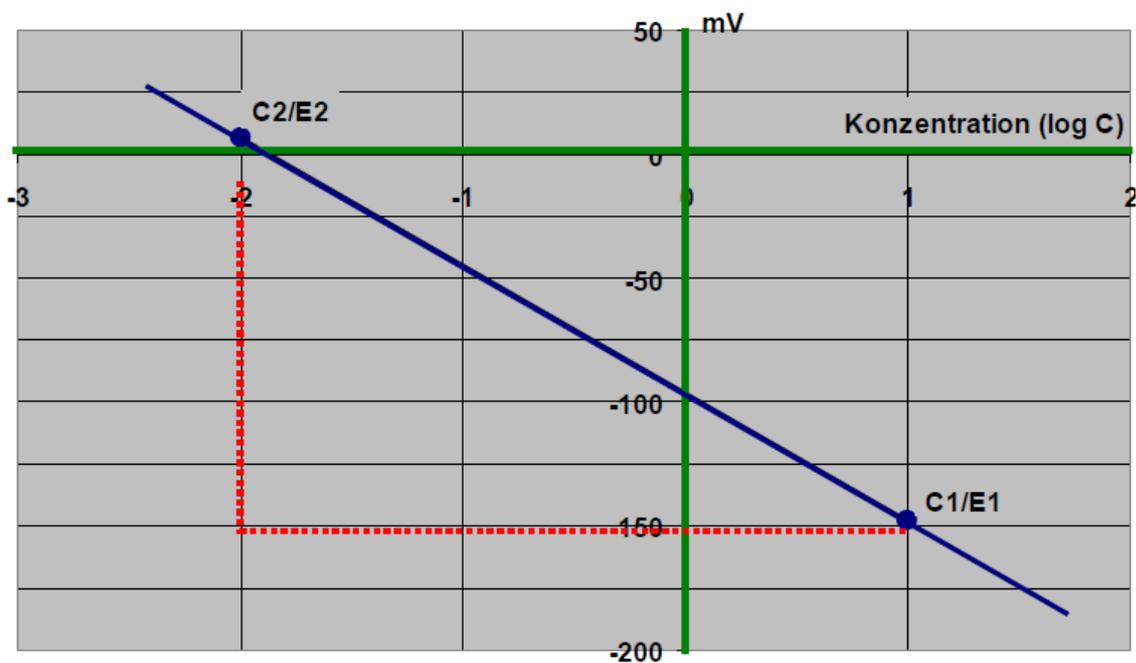


Abb. 14: 2-Punktkalibrierung: lineare Kurve von zwei Standardlösungen (C1 und C2) und die resultierenden Potenziale E1 und E2

Eine 2-Wertkorrektur sollte angewendet werden, wenn große Konzentrationsschwankungen vorliegen und die anderen Korrekturen keine erwünschten Ergebnisse erzielen. Als große Konzentrationsschwankung wird verstanden, wenn bei aufeinanderfolgenden Messungen, innerhalb von zwei bis vier Tagen, der höchste gemessene Wert um ein 5-faches höher ist als der niedrigste gemessene Wert.

Es folgt eine Betrachtung der LDO sc Prozess-Sonde für die Messung von gelöstem Sauerstoff. Hierbei kann in Luft oder mit Hilfe eines Vergleichs kalibriert werden.

Bei der Kalibrierung durch Luft wird der Sensor zunächst gereinigt und dann in einen Kalibrierbeutel gefügt, indem sich Wasser befindet, ohne dabei das Wasser zu berühren. Zur Stabilisierung benötigt der Sensor 15 Minuten Zeit vor der Kalibrierung. Hat sich der Wert stabilisiert, ist der Kalibrierungsprozess beendet.

Für die Kalibrierung mit Hilfe eines Vergleichs wird ein weiterer Sensor mit angeschlossenen Messgerät verwendet. Bei der Wartung muss der Sensor regelmäßig, mindestens alle 90 Tage, gereinigt, auf Schäden überprüft und gegebenenfalls kalibriert werden (HACH Company/HACH Lange GmbH, 2017).

Die Kalibrierung des OPUS-Tauchsensors ist weitaus komplexer als die der vorangegangenen beschriebenen Sonde. Es werden ein Labor- und ein Messwert ermittelt und deren Division ergibt einen Skalierungsfaktor. Mit diesem Faktor wird die Kalibrierung mit Hilfe einer linearen Gleichung angepasst (Abb. 15).

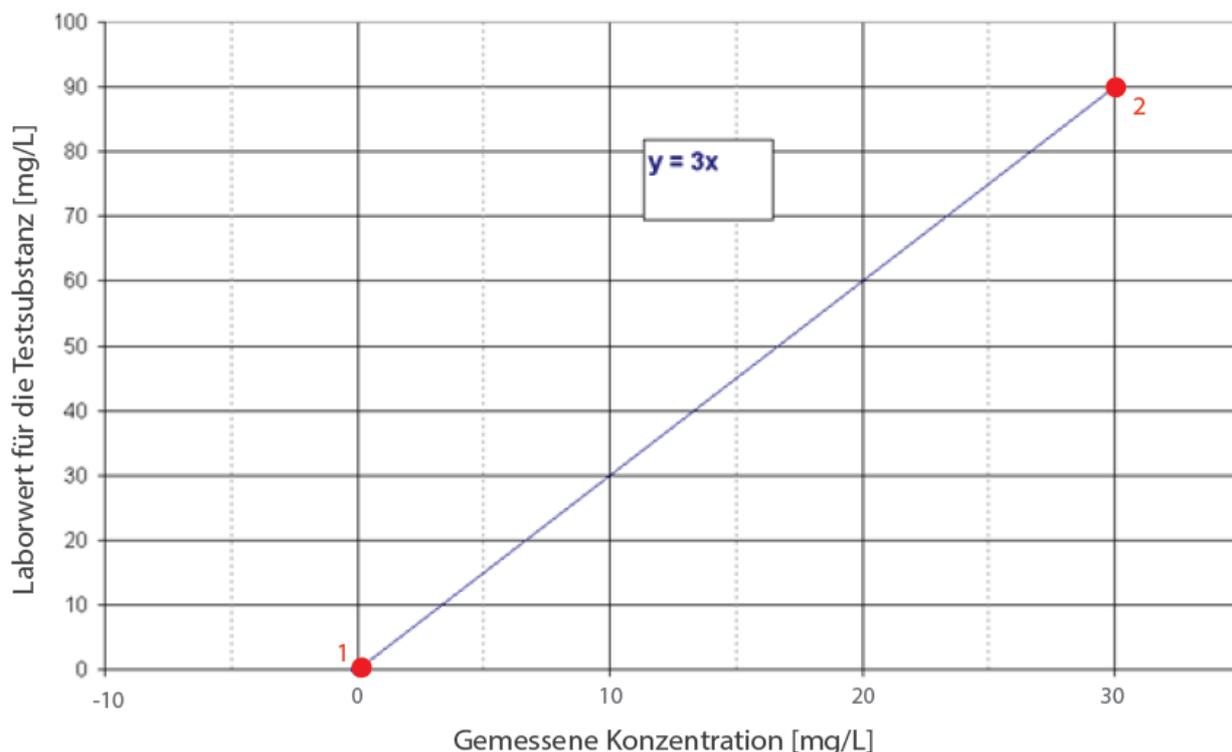


Abb. 15: Kalibriergerade des OPUS-Tauchsensors

Es existieren an Punkt 1 und Punkt 2 jeweils ein Datenpunkt, bestehend aus einem Labor- (y-Achse) und einem Sensorwert (x-Achse). Falls mehr Laborwerte zur Verfügung stehen, ist es sinnvoll, diese zu verwenden. Diese Punkte werden verbunden und die Steigung der Geraden ergibt den Skalierungsfaktor. Mit der

hieraus entstandenen Geradengleichung wird die lokale Kalibrierung angepasst (Heuermann, 2017).

4.5. Labormessungen

- Küvettentests

Um die notwendigen Parameter im Labor messen zu können, wurden die folgenden in Tabelle 7 aufgelisteten Küvettentests von Hach® verwendet.

Tab. 7: Übersicht zu den verwendeten Küvettentests

L C K	Para meter	Messbereich min-max [mg·L ⁻¹]	Bestim mungs grenze [mg·L ⁻¹]	Verfahrens standardab weichung [mg·L ⁻¹]	Mess prinzip	Gemäß Standard- Methode (DIN)	Probe Nahme stelle	Häufig keit
						Kenndaten der Küvetten- tests nach DIN 38402 A51 Nachweis- und Bestimmun gsgrenze nach DIN 32645		alle 2 Woche n
2 3 8	TN	5–40	1,63	0,39	photom etrisch		Ablauf	
3 0 2	NH ₄	47–130	2,4	1,5	"	"	Zulauf Ablauf	2 mal pro Woche
3 0 3	NH ₄	2–47	0,5	0,3	"	"	Nitrifikati on	2 mal pro Woche
3 0 4	NH ₄	0,015–2	0,015	0,005	"	"	Ablauf Ablauf	2 mal pro Woche
3 0 5	NH ₄	1–12	0,099	0,13	"	"	Nitrifikati on	2 mal pro Woche
3 1 4	CSB	15–150	12,7	0,6	"	"	Ablauf	2 mal pro Woche
3 3 8	TN	20–100	1,95	0,6	"	"	Zulauf	alle 2 Woche n
3 3 9	NO ₃	0,23–13,50		0,629	"	"	Ablauf	2 mal pro Woche

3								2 mal
4								pro
0	NO ₃	5–35	3,1		"	"	Ablauf	Woche
5								2 mal
1								pro
4	CSB	53–2500	13,7	3,7	"	"	Zulauf	Woche

Um zu kontrollieren, ob die Sonden die richtigen Werte messen, werden die Parameter, CSB, Nitrat und Ammonium, zweimal wöchentlich im Labor mit Hilfe von Küvettentests von Hach überprüft.

- Trockensubstanzen

Auch die Trockensubstanzen in den jeweiligen Tanks (Membran-, Filtration- und Denitrifikationstank) werden zweimal wöchentlich, ebenso wie das Schlammvolumen, kontrolliert. Die Trockensubstanzmessung erfolgt nach DIN 38409, indem zuerst eine Schale mit Papierfilter bei 105 ± 2 °C für mindestens 24 Stunden getrocknet wird. Nach Erkalten werden diese zusammen gewogen. Von der Probe werden 50 ml in den Filter gegeben, überschüssiges Wasser abgetropft und die Schale mit Filter und Inhalt wieder für mindestens 24 Stunden bei 105 ± 2 °C in den Muffelofen gegeben. Nach dem Erkalten im Exsikkator wird die Schale mit Filter und Probe erneut gewogen. Ausgewertet wird die Messung mit folgender Gleichung:

$$\beta_{GT} = \frac{m_T}{V_p} * f, \quad \left[\frac{g}{L} \right] \quad m_T = m_b - m_a \quad (10)$$

β_{GT} = Gesamttrockenrückstand der unfiltrierten Probe

m_T = Trockenmasse [g]

m_a = Masse der leeren Schale + Filter [g]

m_b = Masse der Schale + Filter + Trockenmasse [g]

V_p = Volumen der eingesetzten unfiltrierten Wasserprobe [mL]

f = Faktor: $f = 1000$ mg/g

- Schlammvolumen

Das Schlammvolumen wird nach DIN 38414 bestimmt. Hierfür werden jeweils 200 ml Probe aus dem Membrantank, der Nitrifikation und der Denitrifikation entnommen und im Verhältnis 1:4 mit Filtrat bis 1.000 ml aufgefüllt. Dies muss für

30 Minuten stehen gelassen werden, um dann ablesen zu können, wie viel Schlamm sich abgesetzt hat. Dieser Wert muss letztlich noch mit fünf multipliziert werden, da die Probe verdünnt wurde.

- Probenvorbereitung

Die Parameter, die in der Pilotanlage manuell gemessen wurden, sind: CSB, Ammonium, Nitrat, Nitrit, TN, TOC, Ortho-Phosphat, Gesamtphosphat und organische Säuren. NH_4 , CSB, TP, TOC, TN und Ortho-Phosphat werden in der Zulaufprobe gemessen. Dafür muss die Zulaufpumpe der Pilotanlage angeschaltet werden. Für den filtrierten CSB wird die Probe zunächst mit einem Papierfilter und folgend mit einem $0,45\ \mu\text{m}$ Filter filtriert. Für Ammonium, organische Säuren und Ortho-Phosphat genügt die zweite Filtration. In der Nitrifikation wird lediglich das Ammonium analysiert. Hierfür wird die Probe entnommen, mit einem Papierfilter und schließlich mit einem $0,45\ \mu\text{m}$ Filter filtriert. Im Ablauf werden, wie im Zulauf, die Parameter CSB, Ammonium, TP, TOC, TN und Ortho-Phosphat und zusätzlich noch die Parameter NO_3 und NO_2 gemessen. Für die Ablaufprobeentnahme besitzt die Anlage zwei Hähne, denen die Proben entnommen werden. Dafür wird nach Öffnen der Hähne ca. eine Minute Permeat laufen gelassen, da durch abgestandenes Wasser in den Leitungen das Ergebnis verfälscht werden kann. Schließlich wird die Probe unter laufendem Wasser entnommen.

4.6. Versuchsdurchführung

In Tabelle 8, S. 41 sind die einzelnen Versuchsabschnitte zusammengefasst, die in der Pilotanlage durchgeführt wurden. Es wurde mit zwei Einfahrphasen begonnen. Ab dem 05.08.2021 bis zum 22.08.2021 fand die Sauerstoff-basierte Regelung statt. Am 20.09.2021 wurde das Air-Cycling bei der Belüftung der Membranen gestartet, welches am 03.12.2021 endete. Ab dem 18.10.2021 wurde die Ammonium-basierte Regelung („feedback control“) umgesetzt, die ab dem 17.11.2021 abgelöst wurde durch die Ammonium-basierte Steuerung „feedforward control“.

Tab. 8: Übersicht über die Versuchsabschnitte der Pilotanlage

Periode	Versuchsbezeichnung	Zeitraum	Regelung
1	Einfahrphase 1	03.03.2021 –	- zeitgesteuerte Belüftung Nitrifikation

		18.04.2021	<ul style="list-style-type: none"> - dauerhafter Betrieb - Belüftung Membranen - manuelle Abgabe - Überschussschlamm
2	Einfahrphase 2	19.04.2021 – 14.06.2021	<ul style="list-style-type: none"> - Zeitgesteuerte - Belüftung Nitrifikation - Dauerhafter Betrieb - Belüftung Membranen - Automatische Abgabe - Überschussschlamm
3	O ₂ -Regelung	15.06.2021 – 22.08.2021	<ul style="list-style-type: none"> - Regelung Belüftung - Nitrifikation nach - Sollwert O₂ im - Nitrifikationstank - Dauerhafter Betrieb - Belüftung Membranen - Automatische Abgabe - Überschussschlamm
4	Keine Belüftung Nitrifikation	23.08.2021 – 19.09.2021	<ul style="list-style-type: none"> - Keine Belüftung in - Nitrifikation - Dauerhafter Betrieb - Belüftung Membranen - Automatische Abgabe - Überschussschlamm
5	Air-Cycling	20.09.2021 – 02.12.2021	<ul style="list-style-type: none"> - Belüftung der - Membran im Intervall
6	NH ₄ -Regelung „feedback control“	18.10.2021 – 16.11.2021	<ul style="list-style-type: none"> - Sollwert O₂ für - Regelung Belüftung - Nitrifikation abhängig - von Ammonium im - Ablauf - Automatische Abgabe - Überschussschlamm
7	NH ₄ -Regelung „feedforward control“	17.11.2021 – 13.12.2021	<ul style="list-style-type: none"> - Sollwert O₂ für - Regelung - Membranbelüftung - abhängig von - Ammonium im Zulauf - Belüftung Nitrifikation - AUS - Automatische Abgabe - Überschussschlamm

7.1	„	17.11.2021 – 29.11.2021	- 40 %ige Belüftung des Membrantanks bis 65 mg·L ⁻¹ Ammonium im Zulauf mit Air-Cycling
7.2	„	29.11.2021 – 03.12.2021	- 60 %ige Belüftung des Membrantanks bis 65 mg·L ⁻¹ Ammonium im Zulauf mit Air-Cycling
7.3	„	03.12.2021 – 06.12.2021	- 55 %ige Belüftung des Membrantanks bis 65 mg·L ⁻¹ Ammonium im Zulauf ohne Air-Cycling
7.4	„	06.12.2021 – 07.12.2021	- 50 %ige Belüftung des Membrantanks bis 65 mg·L ⁻¹ Ammonium im Zulauf ohne Air-Cycling
7.5	„	07.12.2021 – 13.12.2021	- 40 %ige Belüftung des Membrantanks bis 65 mg·L ⁻¹ Ammonium im Zulauf ohne Air-Cycling

Die Tabellen 9 und 10, S. 43 zeigen ein Beispiel, wie die Belüftung der Nitrifikation und des Ablaufs für die „feedback control“ Regelung eingestellt wurde.

Tab. 9: Belüftung der Nitrifikation anhand der Ammoniumwerte in der Nitrifikation

Belüftung in der Nitrifikation O ₂ -Sollwert [mg·L ⁻¹]	Ammonium mehr als [mg·L ⁻¹]	Ammonium bis... [mg·L ⁻¹]
Verdichter aus	0,0	22,5
0,5	22,5	25,0
1,0	25,0	27,5
1,5	27,5	30,0
2,0	30,0	32,5

2,5	32,5	n.A.
-----	------	------

Tab. 10: Belüftung der Nitrifikation anhand des Ablaufwertes

Belüftung in der Nitrifikation O ₂ -Sollwert [mg·L ⁻¹]	Ammonium im Ablauf mehr als [mg·L ⁻¹]
0,5	5,0

Solange der Ammoniumwert der Nitrifikation 22,5 mg·L⁻¹ nicht übersteigt, ist der Verdichter für die Belüftung der Nitrifikation aus. Sobald der Ammoniumwert aber die 22,5 mg·L⁻¹ übersteigt, sind Sauerstoff-Sollwerte für die Nitrifikation vorgegeben. Liegt die Ammoniumkonzentration beispielsweise zwischen 27,5 und 30,0 mg·L⁻¹, soll durch die Belüftung der Sauerstoffwert in der Nitrifikation bei 1,5 mg·L⁻¹ liegen.

Zusätzlich werden bei dieser Regelung noch die Ammoniumwerte des Ablaufes überprüft. Erreicht dieser 5 mg·L⁻¹ muss der Sauerstoffwert der Nitrifikation 0,5 mg·L⁻¹ betragen (Tabelle 10). Die Ammoniumkonzentration im Ablauf war zuerst auf 2 mg·L⁻¹ eingestellt, bis festgestellt wurde, dass die ANISE sc Sonde unter 5 mg·L⁻¹ nicht mehr verlässlich messen kann.

In Tabelle 11, S. 44 ist ein Beispiel aufgeführt, wie die „feedforward control“ Steuerung durchgeführt wurde. Die Auswertung der Daten zeigt, dass die Ammoniumwerte im Zulauf meistens zwischen 60 - 80 mg·L⁻¹ liegen. Damit wurde berechnet wie viel Sauerstoffeintrag notwendig ist, um 70 % Ammoniumabbau zu schaffen. Solange der Ammoniumwert im Zulauf 65 mg·L⁻¹ oder weniger betrug, fand eine 40 %ige Belüftung des Membrantanks statt, was 11,5 Nm³·h⁻¹ entspricht. Es wurde hierbei gleichzeitig das Air-Cycling angewendet. Das heißt, dass die Membranen abwechselnd alle 30 Sekunden belüftet wurden, bis dieses am 03.12.2021 ausgeschaltet wurde. Alle weiteren Einstellungen, die während dieser Steuerung oder der „feedback control“-Regelung vorgenommen wurden, sind im Anhang vermerkt.

Tab. 11: Belüftung des Membrantanks anhand der Ammoniumwerte im Zulauf

Belüftung im Membrantank	Ammonium Zulauf
--------------------------	-----------------

40 % (11,5 Nm ³ ·h ⁻¹ , 30/30 s)		≤ 65 mg·L ⁻¹
45 % (13,0 Nm ³ ·h ⁻¹ , 30/30 s)	> 65 mg·L ⁻¹	≤ 70 mg·L ⁻¹
50 % (14,3 Nm ³ ·h ⁻¹ , 30/30 s)	> 70 mg·L ⁻¹	≤ 75 mg·L ⁻¹
55 % (15,8 Nm ³ ·h ⁻¹ , 30/30 s)	> 75 mg·L ⁻¹	≤ 80 mg·L ⁻¹
60 % (17,2 Nm ³ ·h ⁻¹ , 30/30 s)	> 80 mg·L ⁻¹	≤ 85 mg·L ⁻¹
65 % (18,7 Nm ³ ·h ⁻¹ , 30/30 s)	> 85 mg·L ⁻¹	

Diese Steuerung wurde vom 22.11.2021 bis zum 13.12.2021 ausgewertet. Während dieses Zeitraumes wurde die Menge der Belüftung mehrfach geändert. Am 29.11.2021 wurde die Drehzahl des Verdichters im Membrantank um 20 % erhöht, am 03.12.2021 aber schon wieder um 5 % gesenkt, ebenso nochmals am 06.12.2021, um schließlich am 07.12.2021 die Drehzahl um weitere 10 % zu reduzieren.

Je nachdem, ob die Belüftung in der Nitrifikation an- oder ausgeschaltet war, musste die Belüftung der Membranen angepasst werden.

4.7. Datenauswertung

Die in der Pilotanlage verwendeten Sonden übermitteln alle zwei Minuten ihre Daten. Diese können sowohl in Echtzeit als auch in Form einer Excel-Tabelle abgerufen werden.

Mit Hilfe dieser Daten kann ausgewertet werden, ob die Anlage in gewünschter Weise funktioniert oder ob Fehler auftreten. Außerdem wird ein Vergleich mit den Labordaten durchgeführt, um festzustellen, ob die Sonden in gewünschter Weise funktionieren und somit die richtigen Werte messen oder gegebenenfalls gereinigt oder kalibriert werden müssen. Soweit es möglich war, wurden die Daten täglich beobachtet, um rechtzeitig über kurzfristige Veränderungen Bescheid zu wissen und so eine optimale Betriebsführung gewährleisten zu können. Zudem wurden die Daten einmal wöchentlich mit Hilfe des Microsoft Office-Tools Excel ausgewertet.

5. Ergebnisse und Diskussion

5.1. Auswertung der Ablaufqualität

Durch die verschiedenen Regelungen soll weiterhin eine gute Reinigungsleistung erbracht werden. Somit wird in diesem Kapitel die Ablaufqualität der Ammonium-basierten Regelung analysiert und zum Vergleich der Zeitraum der Sauerstoff-basierten Regelung mit herangezogen. Da bis einschließlich des 14.06.2021 noch die Einfahrphasen der Anlage stattfanden, zeigen die folgenden Diagramme der Parameter Ammonium, Nitrat und CSB den Zeitraum ab dem 15.06.2021 bis zum 13.12.2021. Die Erklärung zu den einzelnen Perioden, die in den folgenden Diagrammen vermerkt wurden, sind in Kapitel 4.6, S.40 vorzufinden.

Im Diagramm der Abbildung 16 sind die Ammoniumlaborwerte des Ablaufs dargestellt.

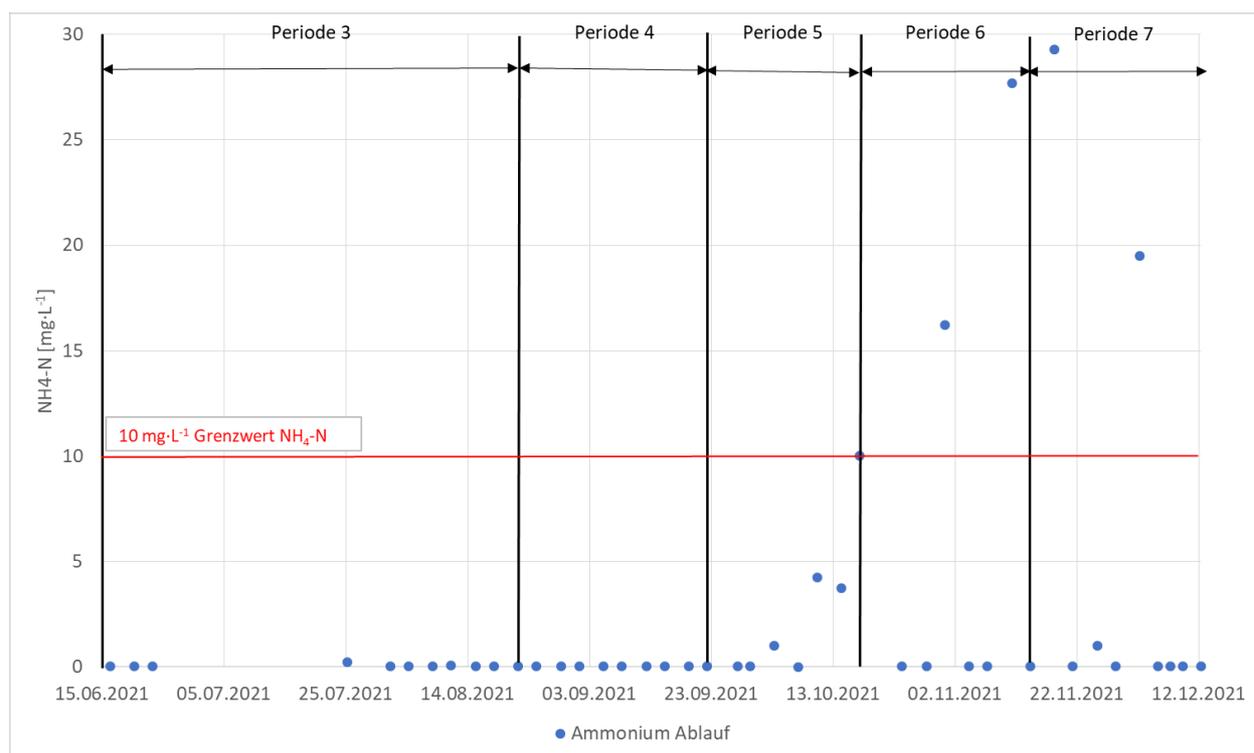


Abb. 16: Ammoniumlaborwerte des Ablaufs 15.06.2021–13.12.2021

Während der Sauerstoff-basierten Regelung (Periode 3) beträgt die Ammoniumkonzentration um $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Bestimmungsgrenze der Küvettentests liegt bei $0,015 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Im Juli wurden keine Ammoniumablaufwerte im Labor gemessen, weshalb für diesen Zeitraum keine Werte im Diagramm eingetragen sind. Mit dem Start des Air-Cyclings (Periode 5) beginnen die

Ammoniumkonzentrationen zu steigen. Dieser Trend ist mit dem Start der Ammonium-basierten Regelung weiterhin zu beobachten. Als Richtwert werden die Grenzwerte, die im Klärwerk Stahnsdorf, auf dessen Gelände sich die Pilotanlage befindet, verwendet. Es gilt, dass der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Grenzwert von $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ nicht überschritten werden darf. Dies geschieht wenige Male während der Ammonium-basierten Regelung. Zur Zeit der Periode 6 ist dies der nicht zuverlässigen Regelung der Belüftung geschuldet. Auf dieses Problem wird näher in Kapitel 5.3, S.49 eingegangen. Zu Beginn der Periode 7 hingegen, weisen die Ablaufwerte so hohe Konzentrationen auf, wie in der Nitrifikation, das heißt, dass die Steuerung zu diesem Zeitpunkt gar nicht funktioniert hat. Das lässt sich damit begründen, dass zu diesem Zeitpunkt die Belüftung in der Nitrifikation ausgeschaltet wurde und die Einstellungen der „feedforward control“ Steuerung erst noch getestet werden mussten, bis diese zuverlässig funktionierte.

Werden nun die Nitratlaborwerte des Ablaufs in Abbildung 17 betrachtet, zeigt sich ein anderes Bild als bei der Ammoniumkonzentration.

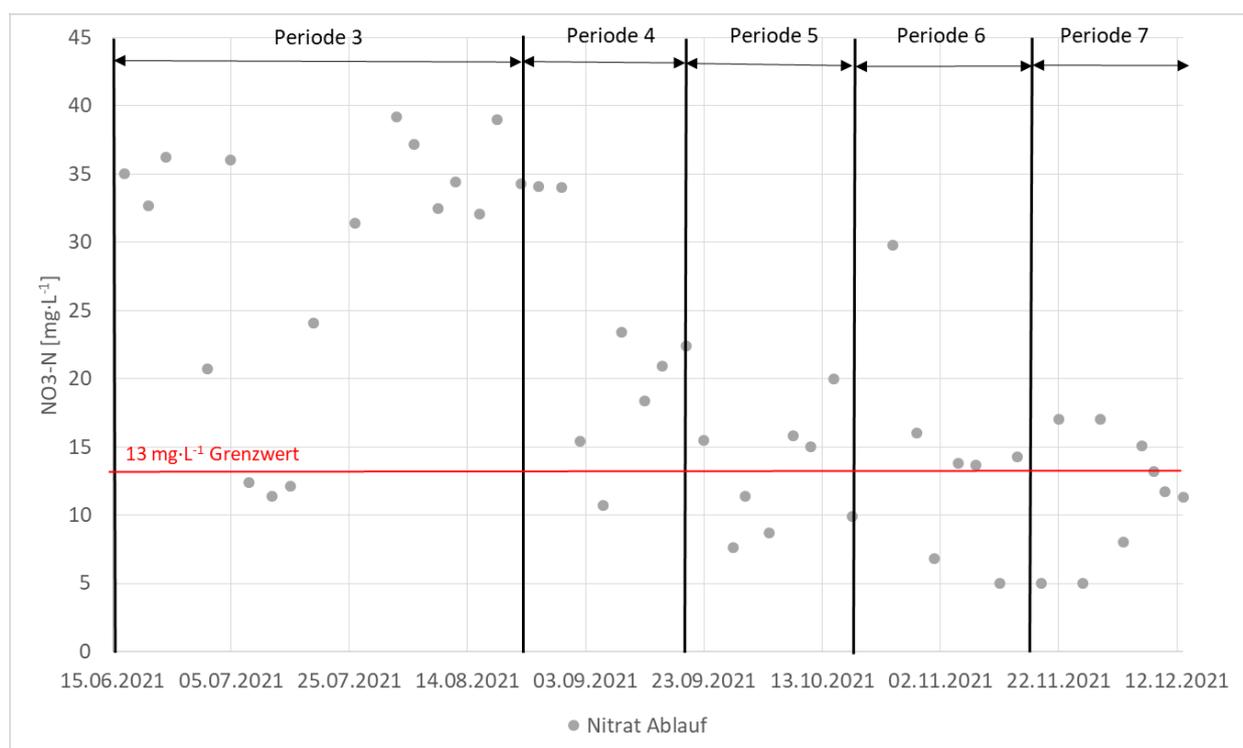


Abb. 17: Nitratlaborwerte des Ablaufs 15.06.2021–13.12.2021

Über den gesamten Zeitraum sind starke Schwankungen von 5 bis ca. $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ zu vermerken. Während des Abschnitts der Sauerstoff-basierten Regelung ist die Spanne der gemessenen Laborwerte fast $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Mit dem Beginn der NH_4 -basierten Regelung (Periode 6) sinken die Werte etwas ab, aber es sind weiterhin

regelmäßige Schwankungen vorhanden. Der Grenzwert für TN liegt bei $13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Dieser wird sehr häufig schon von der Nitratkonzentration ohne Addition der anderen Stickstoffe überschritten. Während der Sauerstoff-basierten Regelung wird der Grenzwert fast über die gesamte Periode hinweg deutlich überschritten.

Die Darstellung der CSB-Laborwerte in Abbildung 18 startet erst am 21., statt schon am 15.06.2021, da in dieser Zeitspanne keine CSB-Werte im Labor ermittelt wurden. Die CSB-Konzentration des Zulaufs liegt in der Regel zwischen 500 und 800 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Die Ablaufkonzentration zeigt, außer an drei Tagen konstant Werte um die 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Dadurch wird deutlich, dass die unterschiedlichen Regelungen keinen Einfluss auf die CSB-Konzentration im Ablauf haben.

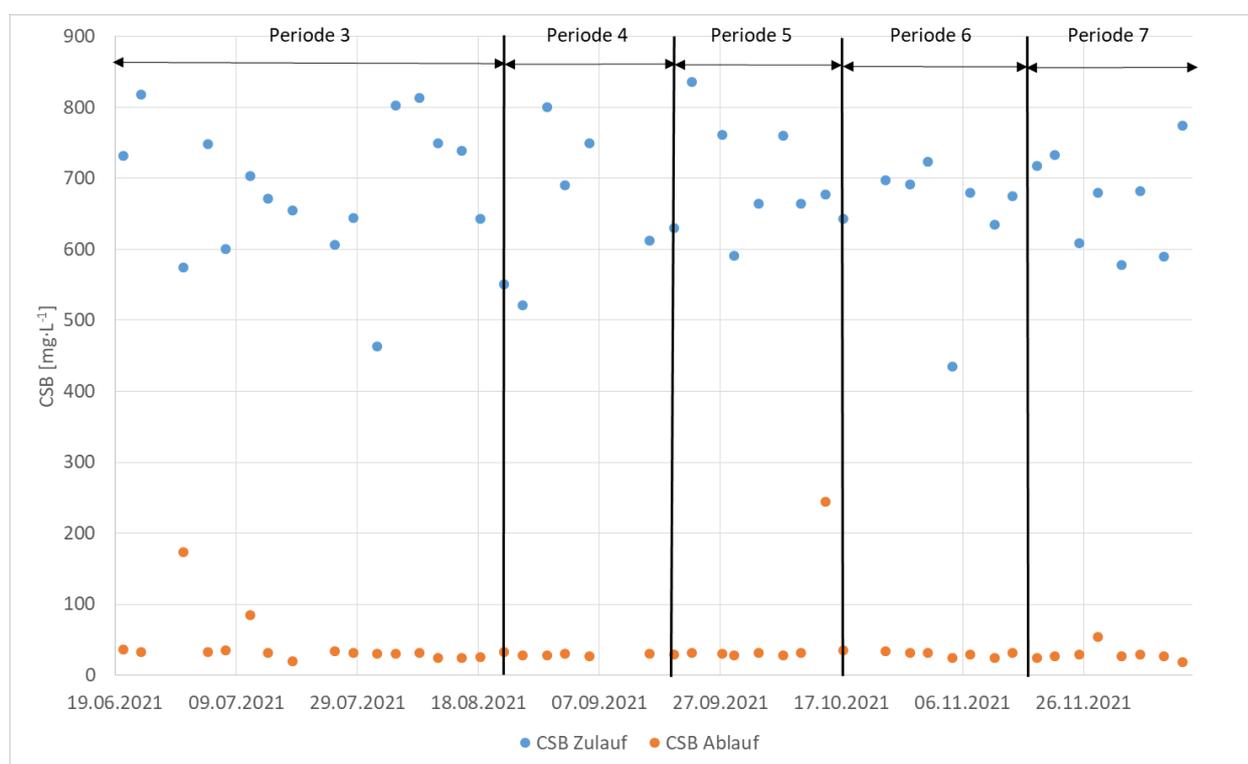


Abb. 18: CSB-Laborwerte des Zulaufs und Ablaufs vom 21.06.2021–13.12.2021

5.2. Sauerstoff-basierte Regelung

Tab. 12: Durchschnittliche Laborwerte der O_2 -basierten Regelung

	NH ₄ -N Konzentration n [$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$]	Standardabwei- chung	NO ₃ -N Konzentration n [$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$]	Standardabwei- chung
Zulauf	64,3	7,04	/	/

Nitrifikation	1,1	1,97	/	/
Ablauf	0,02	0,02	26,8	9,91

5.3. „feedback control“ Regelung

In diesem Kapitel wird nun der Zeitraum der Ammonium-basierten Regelung nach dem Prinzip der „feedback control“ Regelung näher analysiert.

Es wird ein Vergleich der Labor- mit den Online-Messdaten in der Nitrifikation, und dem Ablauf mit Hilfe eines Diagramms durchgeführt. Zunächst wird die Nitrifikation betrachtet.

In der Abbildung 19 sind in blau die Ammoniumdaten der Online-Messung dargestellt und die roten Punkte repräsentieren die im Labor gemessenen Ammoniumwerte. Wie alle weiteren Diagramme in diesem Kapitel auch, ist der Zeitraum vom 02.10.2021 bis 21.11.2021 ausgewertet.

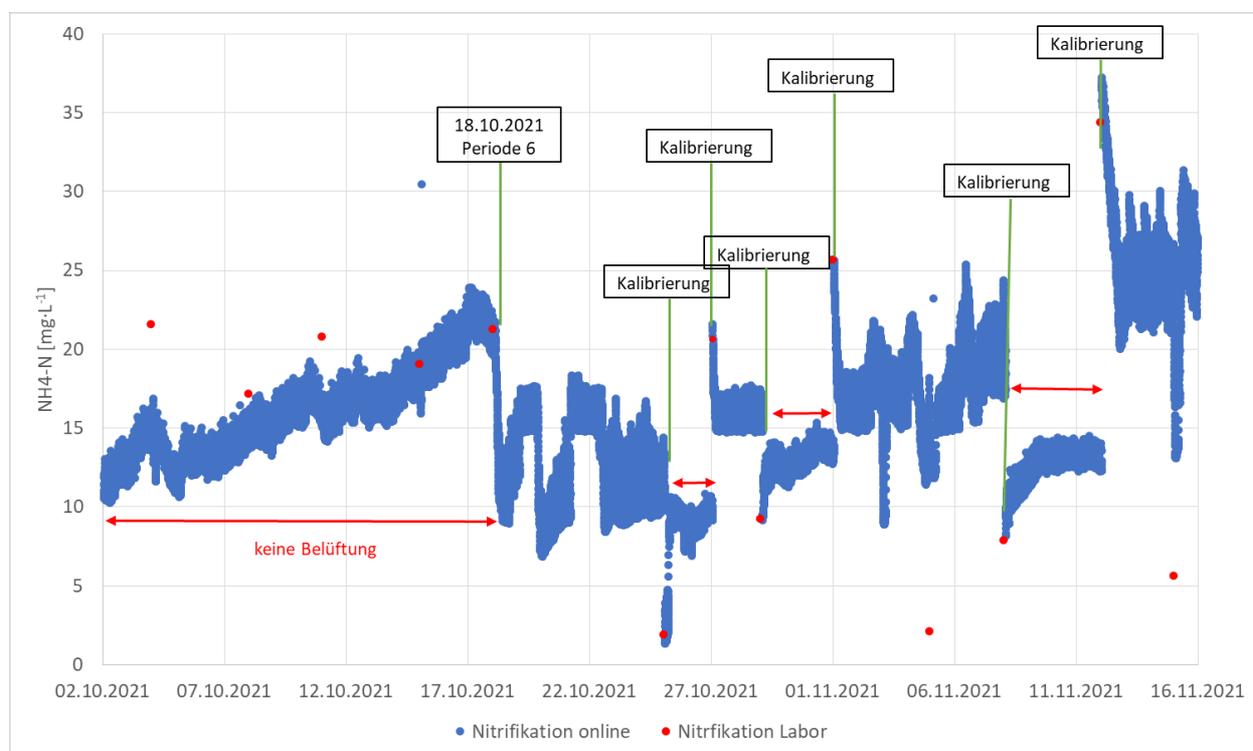


Abb. 19: Labor- und Onlinedaten der Ammoniumwerte in der Nitrifikation

Die Laborwerte zeigen, dass der Ammoniumwert in der Nitrifikation in der Regel zwischen 5 und 25 mg·L⁻¹ liegt. Ab dem 18.10.2021 wurde die Ammonium-basierte

Regelung gestartet („feedback control“). Durch die roten Pfeile sind die Zeiträume gekennzeichnet, in denen keine Belüftung in der Nitrifikation stattfand. Dort ist ersichtlich, dass die Online-Werte bei diesen stabilen Bedingungen gut mit dem Laborwert übereinstimmen. Zu den Zeiten, in denen die Nitrifikation belüftet wurde, ist deutlich zu erkennen, dass die Labormessdaten stark von den Online-Daten abweichen. Dies ist ein schwerwiegendes Problem für die Regelung der Belüftung, weshalb dieses gelöst werden musste. Es wurde versucht, dieses Problem mit Hilfe von Kalibrierungen zu beheben. Es wurden unterschiedliche Kalibrierungen durchgeführt (1-Punkt-, 2-Punktkalibrierungen) und auch der jeweilige Zeitpunkt variiert (während belüfteter und unbelüfteter Phase). Dies zeigte, dass beim Wechsel zwischen belüfteter und unbelüfteter Phase keine Kalibrierung möglich ist. Das wurde dadurch deutlich, dass der gemessene Wert sehr ungenau war. Aber trotzdem hat keine dieser Interventionen den gewünschten langfristigen Erfolg gebracht.

Somit musste nach einer anderen Lösung gesucht werden, da die gewonnenen Messdaten nicht die Realität widerspiegeln und falsche Online-Daten eine falsche Regelung der Belüftung zur Folge haben. Mögliche Gründe, warum keine vernünftigen Messwerte ermittelt werden konnten, sind zum einen, dass beim Wechsel zwischen aeroben und anoxischen Bedingungen große Schwankungen entstehen und zum anderen, dass Stör-Ionen die Messungen verfälschen.

In der Abbildung 20, S. 51 werden nun die Ammoniumwerte der Online- und der Labormessungen des Ablaufs dargestellt. Die blaue Linie repräsentiert wieder die Ammonium-Daten der Online-Sonde und die roten Punkte die dazugehörigen Laborwerte.

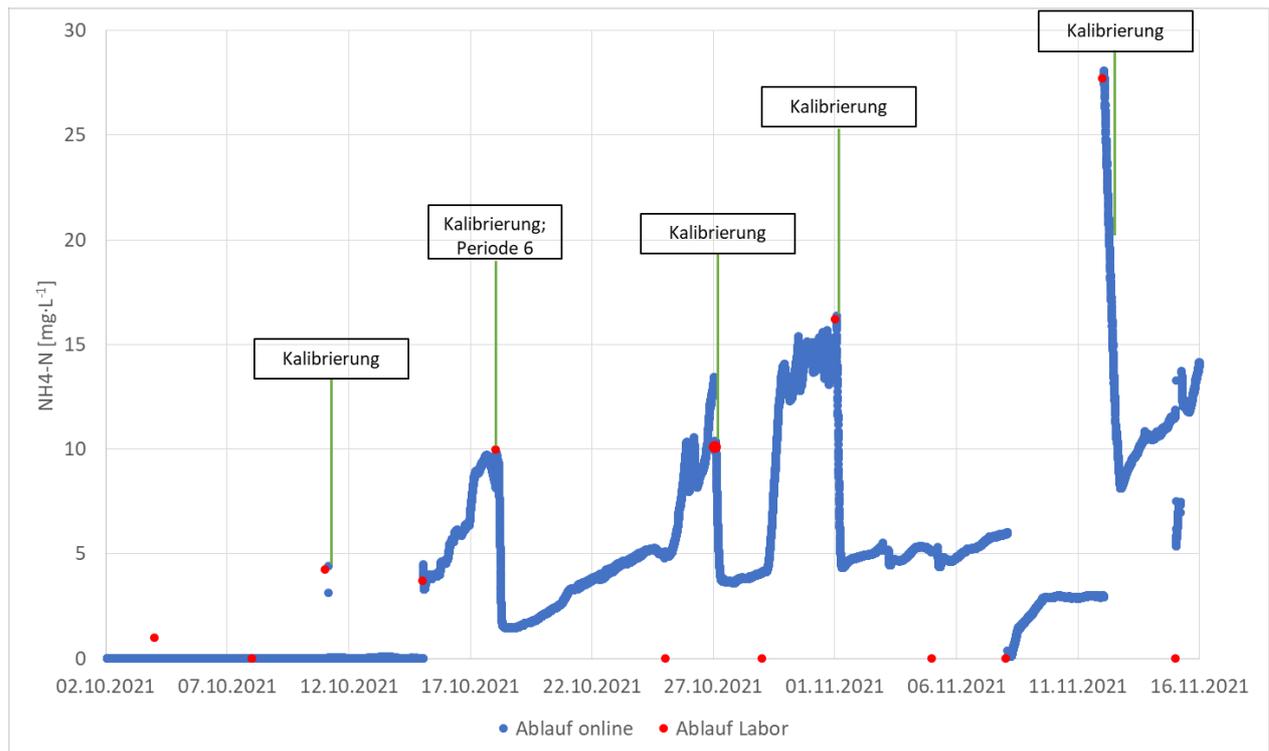


Abb. 20: Labor- und Onlinedaten der Ammoniumwerte im Ablauf

Bis zum Beginn der Ammonium-basierten Regelung zeigte die Sonde durchweg einen Wert von $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ an, da die Ammoniumkonzentration zu gering war, um diese messen zu können. Mit dem Start der Regelung am 18.10.2021 sind sowohl bei den Labor- als auch den Online-Daten starke Schwankungen zu verzeichnen. Diese treten auf Grund der belüfteten und unbelüfteten Phasen der Nitrifikation auf. Es kann festgestellt werden, dass die AN-ISE sc Sonde trotz dieser Schwankungen bei Werten über $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ zuverlässig misst, darunter aber starke Abweichungen im Vergleich zum Laborwert zu erkennen sind. Auch mit dieser Sonde wurden mehrfach Kalibrierungen durchgeführt, aber ohne nachhaltige Ergebnisse, aufgrund der starken Schwankungen. Eine zusätzliche Begründung für die Ungenauigkeit könnten Stör-Ionen sein.

Abbildung 21, S. 52 zeigt die Nitratblaufwerte vor dem Start der Ammonium-basierten Regelung bis zum 21.11.2021. In grau sind die Online-Daten und in Grün die Labordaten dargestellt.

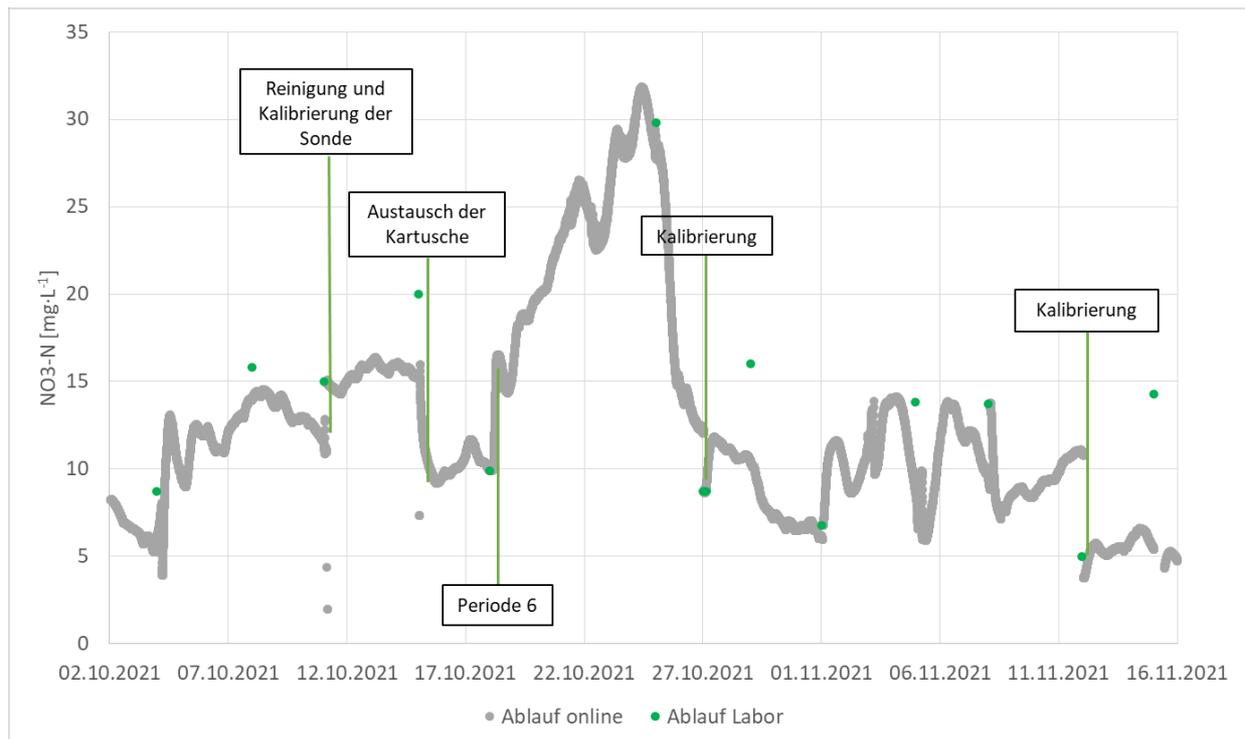


Abb. 21: Labor- und Onlinedaten der Nitratlaufwerte

Da am 11.10.2021 der Sondenwert eine zu große Abweichung vom Laborwert aufwies, wurde die Sonde sowohl gereinigt als auch kalibriert. Da dies nicht seinen Zweck erfüllte und am 15.10.2021 immer noch zu großen Abweichungen gemessen hat, wurde die Kartusche des Sensors ausgetauscht, da dies nach Empfehlung des Herstellers nach neun Monaten durchgeführt werden sollte. Daraufhin stimmten die Labordaten und die Online-Daten bei den folgenden zwei Messungen sehr gut über ein, woraufhin am 18.10.2021 die Ammonium-basierte Regelung begann. Aber schon am 27.10.2021 musste eine erneute Kalibrierung aufgrund zu hoher Abweichungen durchgeführt werden. Am 12.11.2021 musste erneut eine Kalibrierung durchgeführt werden. Es zeigt sich hier insgesamt das gleiche Bild wie bereits bei den Ammoniumwerten in der Nitrifikation und dem Ablauf. Bei stabilen Bedingungen stimmt der Online-Wert gut mit dem Laborwert überein. Für instabile Bedingungen war es nicht möglich, die Sonden soweit zu kalibrieren, dass die Abweichung zum Laborwert bei maximal 5 % lag.

5.4. „feedforward control“ Steuerung

Die Abbildung 22, S. 53 zeigt, wieder in blau, die Online-Daten und, in rot die Labordaten der Ammoniumkonzentration im Zulauf. Durch die wöchentliche Auswertung der Daten wurde festgestellt, dass sowohl die Labor- als auch die

Sondenwerte stabil zwischen $60\text{-}90\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ lagen. Wie in Abbildung 22 zu erkennen, misst die AISE sc Sonde im Zulauf sehr zuverlässig.

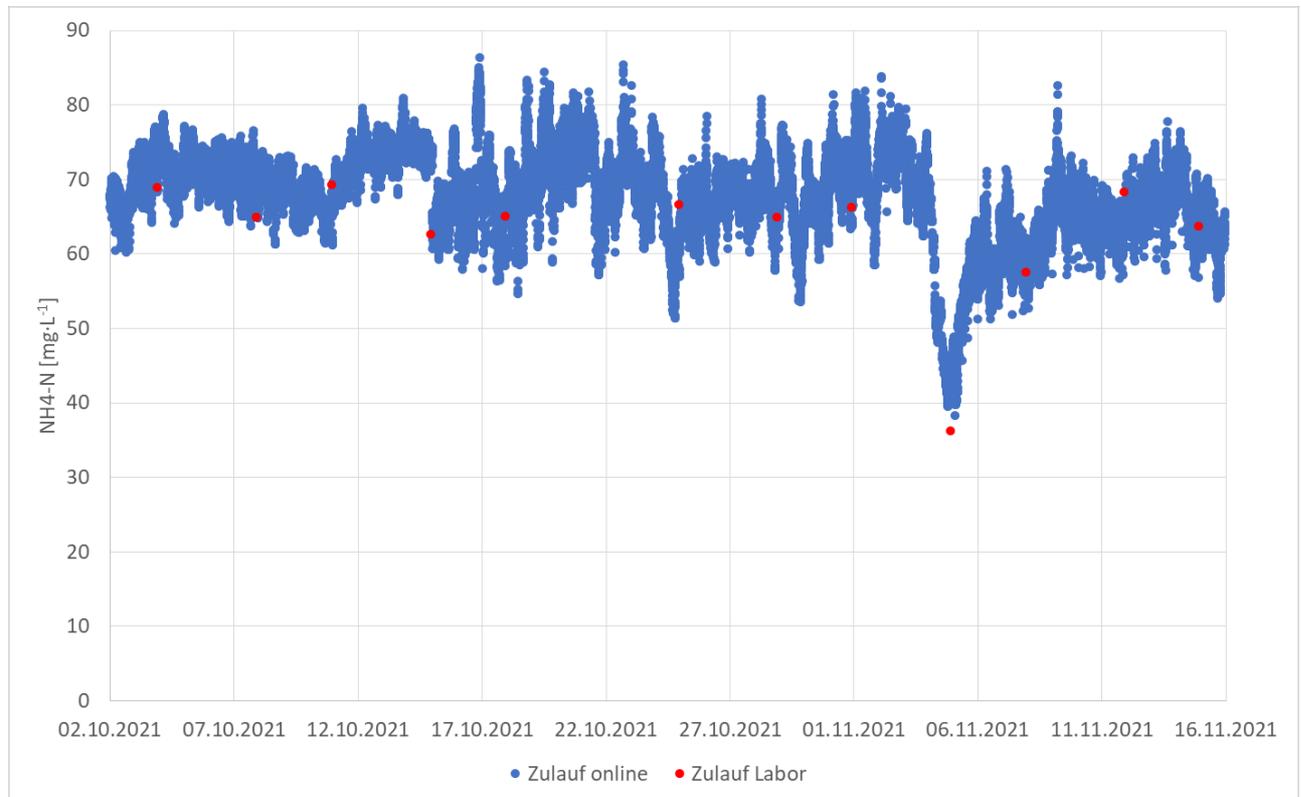


Abb. 22: Labor- und Onlinedaten der Ammoniumkonzentration im Zulauf

Da eine Lösung für die unzuverlässigen Messungen in der Nitrifikation und des Ablaufs bezüglich der Ammoniumwerte gefunden werden musste, hat die Stabilität der Werte zu der Entscheidung geführt, dass ab dem 17.11.2021 die Ammoniumbasierte Regelung insofern abgeändert wurde, dass sie als „feedforward control“ Steuerung durchgeführt wurde. Das bedeutet, dass ab diesem Zeitpunkt nicht mehr die Belüftung in der Nitrifikation angepasst wurde, sondern die Belüftung der Membranen im Membrantank auf Grundlage der Ammoniumwerte im Zulauf gesteuert wurde (siehe Kapitel 4.6).

Die folgenden Diagramme zeigen erst den Zeitraum ab dem 22.11.2021, da vorher die Steuerung in ihren Einstellungen noch getestet werden musste und deshalb keine repräsentativen Daten gewonnen wurden.

Begonnen wird mit der Auswertung der Daten der Nitrifikation. Das Diagramm der Abbildung 23, S. 54 zeigt die von der Sonde gemessenen Ammoniumwerte in der Nitrifikation in blau und die roten Punkte sind die im Labor gemessenen Werte. Es

ist der Zeitraum vom 22.11.2021 bis 13.12.2021 dargestellt, in dem die Ammonium-basierte Regelung umgestellt wurde.

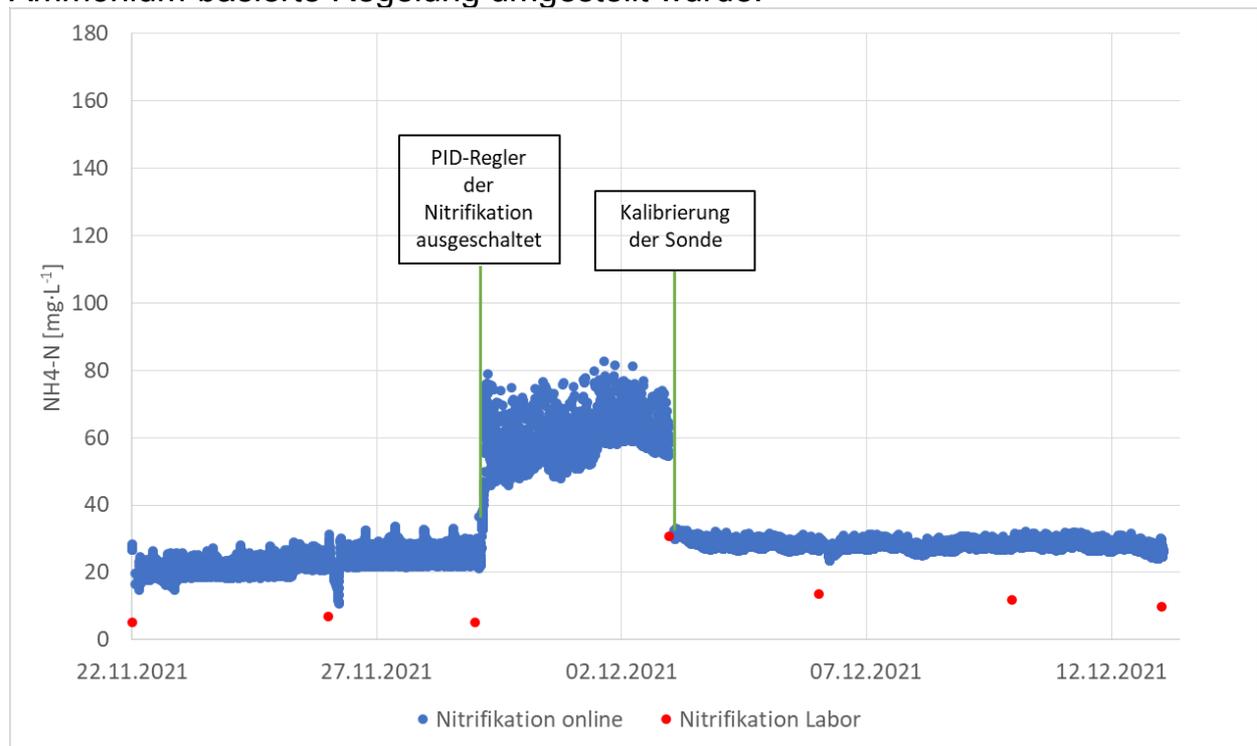


Abb. 23: Labor- und Onlinemessungen der Ammoniumkonzentration in der Nitrifikation vom 22.11.2021–13.12.2021

Es ist zu sehen, dass bis zum Ende das Problem, dass die Online-Daten stark von den Labordaten abweichen, nicht gelöst wurde. Am 29.11.2021 ist ein starker Anstieg der Ammoniumwerte zu verzeichnen, da der PID-Regler der Nitrifikation an diesem Tag ausgeschaltet wurde und die Bakterien sich erstmal auf die veränderte Sauerstoffkonzentration einstellen mussten, um das Ammonium abzubauen. Am 03.12.2021 wurde das Ammonium im Labor ausgewertet und festgestellt, dass die diesbezüglichen Werte sich zwar erhöht hatten, aber deutlich unter dem Sondenwert lagen. Deshalb wurde ein letztes Mal eine Kalibrierung durchgeführt. Ab diesem Zeitpunkt betrug die Abweichung des Sondenwertes vom Laborwert stabil 15-20 mg·L⁻¹. Da die Steuerung der Belüftung nicht auf den Ammoniumwerten der Nitrifikation basierte, wurde die Messabweichung nicht weiter beachtet.

Das Diagramm der Abbildung 22, S. 55 zeigt die Ammoniumablaufwerte während der neuen Steuerung.

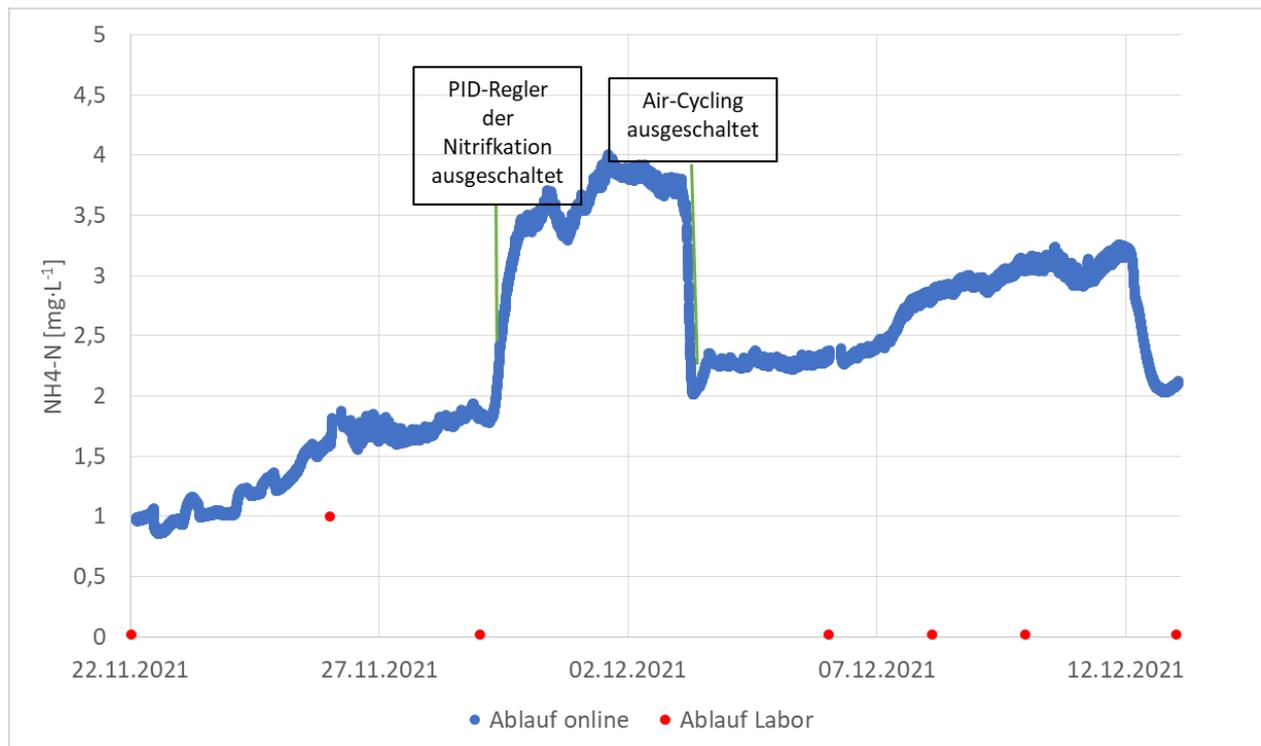


Abb. 24: Labor- und Onlinemessungen der Ammoniumkonzentration im Ablauf vom 22.11.2021–13.12.2021

Alle Laborwerte sind in diesem Zeitraum stabil unter $0,015 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Die Sonde hingegen zeigt starke Schwankungen an, da sie, wie bereits erwähnt, unter $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ nicht mehr verlässlich messen kann. Am 29.11.2021 ist, wie in der Nitrifikation, ein Anstieg der Ammoniumkonzentration zu vermerken, da der PID-Regler in der Nitrifikation ausgeschaltet wurde. Zusammengerechnet mit den Nitratwerten überschreiten die von der Sonde gemessenen Werte den Grenzwert, aber die realen Werte sind sehr gut, womit sich herausstellt, dass diese Regelung in Bezug auf die Ablaufqualität die gewünschten Ergebnisse vorweist. Allerdings sollte über eine Verwendung von Messtechnik nachgedacht werden, die insbesondere auch im unteren Messbereich, unter $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, in der Lage ist, genauere Messdaten zu liefern, um einen besseren Überblick über die Ablaufqualität zu erhalten.

Die Abbildung 25, S. 56 zeigt den zweiten sehr wichtigen Ablaufparameter: das Nitrat.

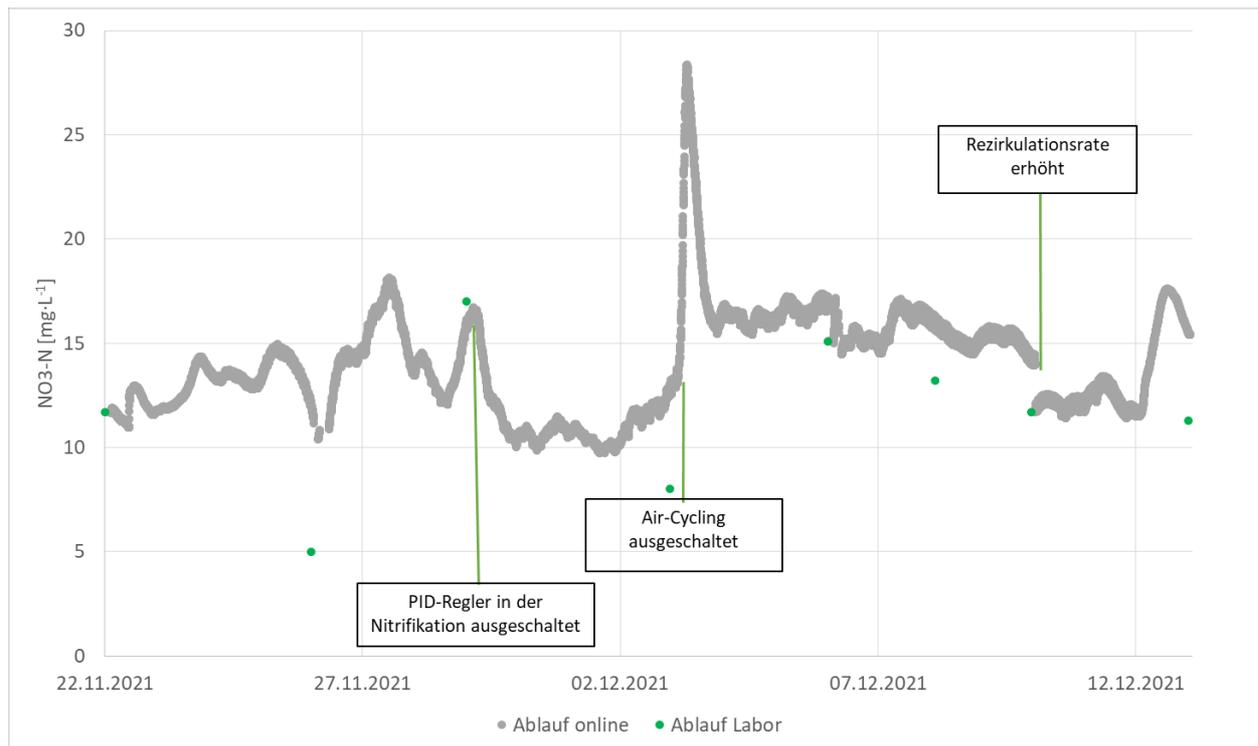


Abb. 25: Labor- und Onlinemessungen der Nitratkonzentration im Ablauf

Werden die Laborwerte näher betrachtet, ist ersichtlich, dass der Grenzwert immer eingehalten wird. Die Online-Daten zeigen nur an einem einzigen Tag, dem 03.12.2021 eine Überschreitung des Grenzwertes. Dass am 29.11.2021 der PID-Regler in der Nitrifikation ausgestellt wurde, ist auch an den Nitratwerten deutlich zu erkennen, da diese absinken. Da weniger Sauerstoff für die Aktivität der Bakterien zur Umwandlung des Ammoniums in Nitrat zur Verfügung stand, wurde weniger Nitrat gebildet. Die Überschreitung des Grenzwertes fand statt, als das Air-Cycling ausgestellt wurde. Am 10.12.2021 ist ein deutlicher Sprung der Daten nach unten zu erkennen. Dies ist damit zu erklären, dass an diesem Tag die Rezirkulationsrate erhöht wurde, welche ein beeinflussender Parameter für den Nitratablaufwert ist.

5.5. Berechnung des Luft- und Energieverbrauchs der verschiedenen Regelungs- und Steuerungstechniken

Bevor die unterschiedlichen Luftmengen berechnet werden, folgt eine Darstellung der unterschiedlichen Belüftungszeiträume der „feedforward control“ Steuerung.

In den folgenden Diagrammen (Abbildung 26–29) sind die einzelnen Abschnitte der „feedforward control“- Steuerung näher betrachtet.

Das Diagramm der Abbildung 26 zeigt den gesamten Zeitraum, 17.11.2021-13.12.2021, in dem die Ammonium-basierte Regelung im Zulauf angewendet wurde. Die blauen Punkte stellen die Online-Daten der AISE sc Sonde dar, die die Ammonium-Werte im Zulauf misst. Die orangefarbenen Punkte repräsentieren die Luftmenge, mit der die Membran 1 und die grünen Punkte die Luftmenge, mit der die Membran 2 belüftet wird.

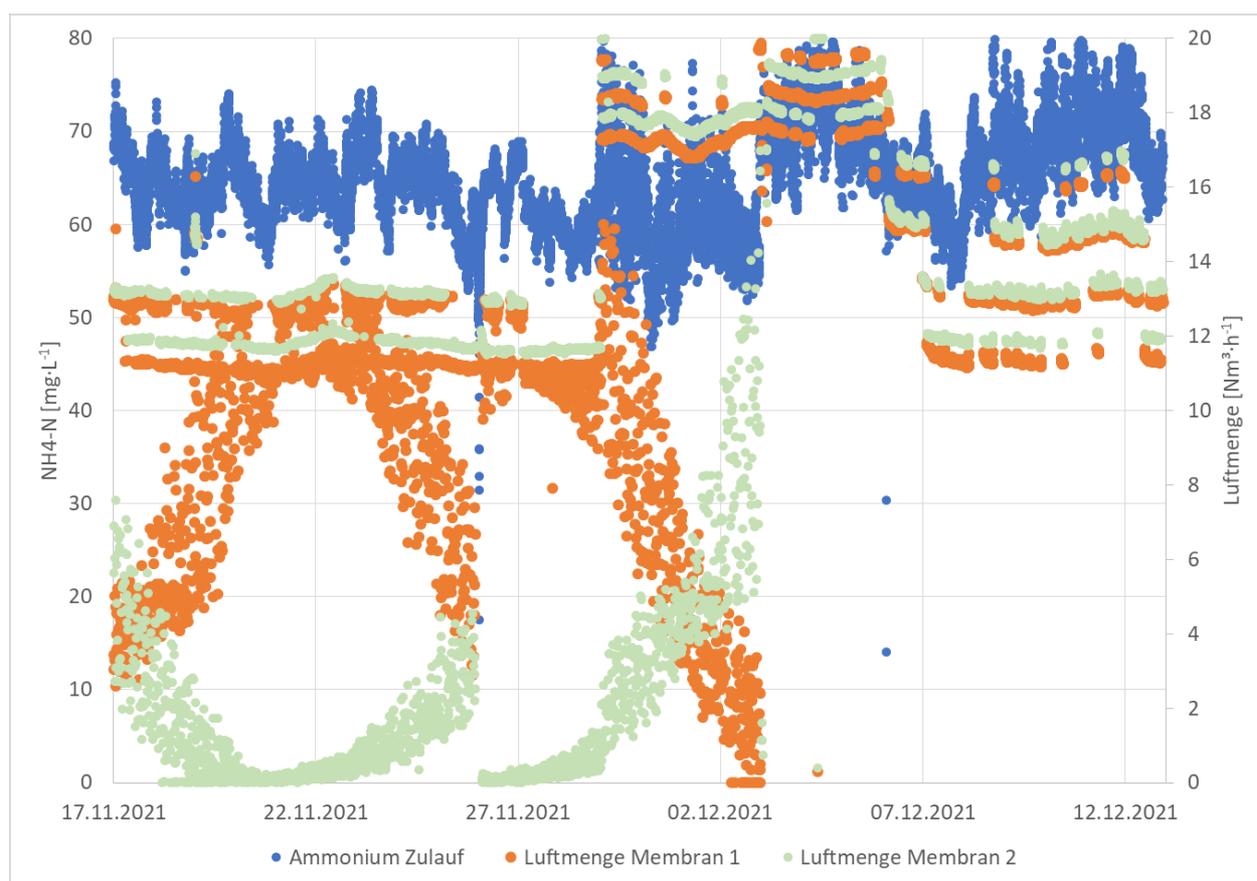


Abb. 26: Ammonium Zulauf und Belüftung der Membranen vom 17.11.2021-13.12.2021

Deutlich zu erkennen ist das Ansteigen und Absinken der Luftmengen aufgrund des Air-Cyclings und dessen Ende. Um aber die einzelnen Belüftungsabschnitte besser interpretieren zu können, werden im Folgenden die einzelnen Abschnitte der Steuerung näher betrachtet. Das nachstehende Diagramm zeigt den Zeitraum vom 17.11.2021 bis zum 03.12.2021:

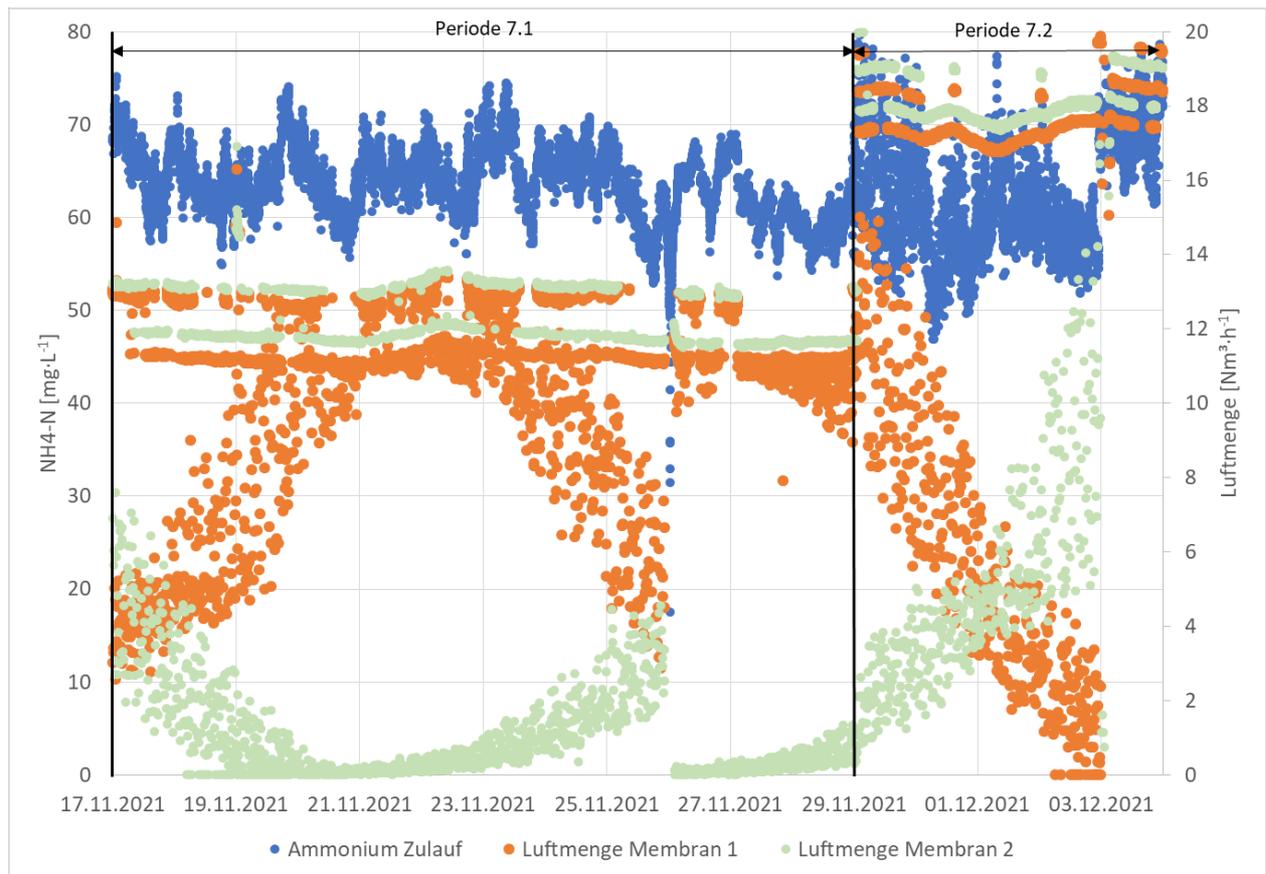


Abb. 27: Ammonium Zulauf und Belüftung der Membranen vom 17.11.2021–03.12.2021

In diesem Zeitraum wurde das Air-Cycling betrieben, weshalb die Belüftung der beiden Membranen abwechselnd steigt und wieder fällt. Am 17.11.2021 wurde die Regelung damit gestartet, dass die Membranen mit $11,3 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ belüftet wurden, solange der Ammoniumwert des Zulaufs $65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ oder weniger betrug. Am 29.11.2021 wurde diese Belüftung auf 60 % erhöht, das entspricht $17,2 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ Luftmenge pro Membran. Diese Erhöhung ist deutlich im Diagramm zu erkennen. Auch ersichtlich wird, dass bei höherem Ammoniumwert die Belüftung steigt, somit diese Regelung wie erwartet funktioniert.

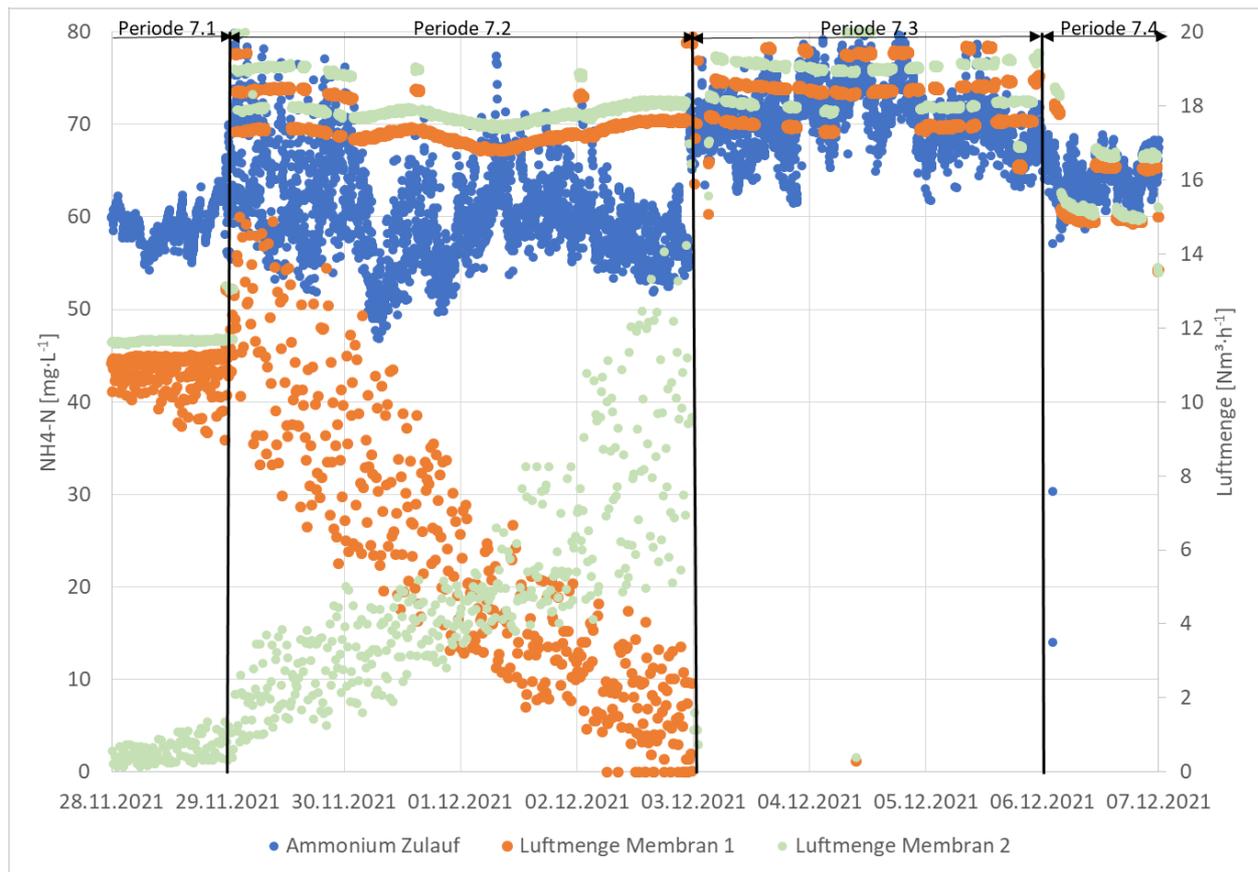


Abb. 28: Ammonium Zulauf und Belüftung der Membranen vom 28.11.2021–07.12.2021

Als nächster Zeitraum wird der 28.11.2021 bis 07.12.2021 betrachtet. Am 29.11.2021 ist erneut die Erhöhung der Belüftung zu sehen, die bereits im vorherigen Diagramm genauer erläutert wurde. Die nächste große Veränderung wurde am 03.12.2021 durchgeführt. An diesem Tag wurde das Air-Cycling beendet und die Belüftung der Membranen um 5 % reduziert. Das Ende des Air-Cyclings ist deutlich zu erkennen, da die Punkte, die für die Luftmenge der beiden Membranen stehen, ab diesem Zeitpunkt nicht mehr auf null zurückgehen, sondern sich nur entsprechend der Einstellung des Verdichters ändern. Am 06.12.2021 wurde die Belüftungsmenge erneut um 5 % verringert, was deutlich durch das Absinken der orangefarbenen und grünen Punkte in der Periode 7.4 erkennbar wird.

Weiterhin ist nun ein Diagramm zu sehen, das den letzten Abschnitt der Ammonium-basierten Regelung im Zulauf betrachtet:

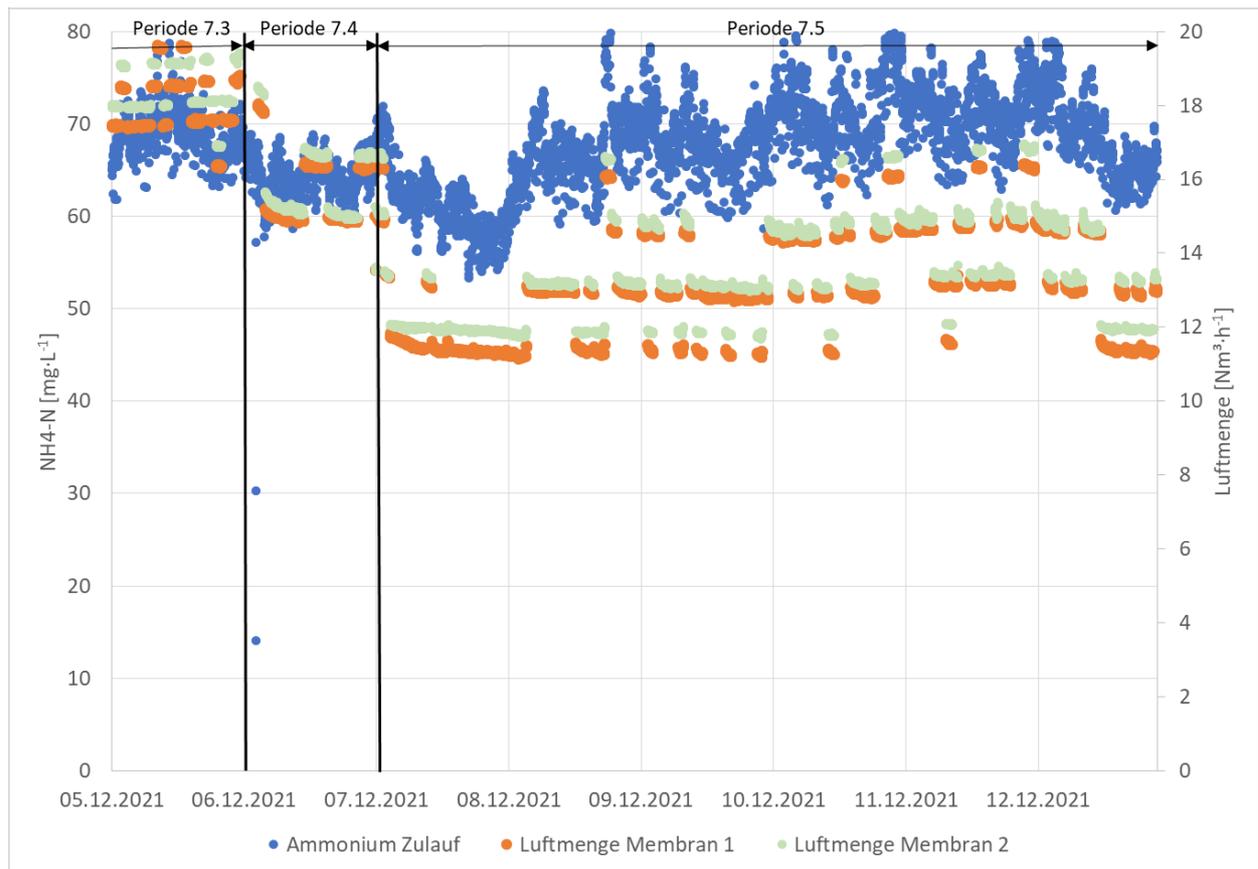


Abb. 29: Ammonium-Zulauf und Belüftung der Membranen vom 05.12.2021–13.12.2021

Um den Unterschied erkennen zu können, ist hier erneut der Zeitraum, in dem die 50 %ige Belüftung stattfand, dargestellt. Ab dem 07.12.2021 wurde zur Anfangseinstellung von 40 %, 11,5 Nm³·h⁻¹ bis 65 mg·L⁻¹ Ammonium im Zulauf, zurückgekehrt, was deutlich im Diagramm durch das Absinken der grünen und orangefarbenen Punkte zu erkennen ist.

Da ermittelt werden will, wie viel Energie mit den jeweiligen Regelungen verbraucht wird und ob durch die Ammonium-basierte Regelung Energie eingespart werden kann, müssen zunächst die jeweiligen Belüftungsmengen berechnet und verglichen werden.

- Luftmengenverbräuche

Nachfolgend werden in der Tabelle 16, S.61 die durchschnittlichen stündlichen Luftmengenverbräuche der verschiedenen Regelungen aufgelistet.

Tab. 13: durchschnittlicher, stündlicher Luftmengenverbrauch

Periode	Ø Luftmenge Nitrifikation [Nm ³ ·h ⁻¹]	Standardab- weichung	Ø Luftmenge Membrantank [Nm ³ ·h ⁻¹]	Standardab- weichung
3	2,2	0,73	22,1	1,48
6 + 7	0,7	0,8	13,3	6,58
6	0,97	0,76	11,2	5,55
7	0,4	0,73	13,3	6,88
7 mit Air- cycling	0,7	0,87	13,5	7,02
7 ohne Air- Cycling	/	/	30,1	2,99
7.1	/	/	11,7	5,75
7.2	/	/	16,6	8,36
7.3	/	/	36,7	2,56
7.4	/	/	31,4	1,16
7.5	/	/	26,5	1,46

Der Vergleich der gesamten Zeiträume der Regelungen zeigt, dass sowohl in der Nitrifikation als auch zur Belüftung der Membranen, bei der Sauerstoff-basierten Regelung stündlich durchschnittlich eine größere Luftmenge benötigt wurde. Dies erklärt sich damit, dass in der Nitrifikation die Belüftung bei der Ammonium-basierten Regelung nach Bedarf eingestellt wurde und für die Belüftung der Membranen bei dieser Regelung über einen großen Zeitraum das Air-Cycling eingesetzt wurde. Die zweite Regelung weist ein genau umgekehrtes Bild auf.

Da für die Nitrifikation während des Zeitraums der NH₄-basierten Steuerung „feedforward control“ kein O₂-Sollwert für die Nitrifikation notwendig war, wurde keine Luftmenge verbraucht. Auch ist ein Unterschied der durchschnittlichen Luftmengen zwischen den beiden NH₄-basierten Regelungen zu erkennen, da die Steuerung im Gegensatz zur Regelung über die Belüftung der Membranen

durchgeführt wurde. Ebenfalls geht aus der Tabelle hervor, dass das Air-Cycling positive Auswirkungen auf die Luftmenge hat, was eine logische Schlussfolgerung ist, da die Membranen mit dieser Regelung zeitweise nicht belüftet werden. Ebenso nachvollziehbar ist, dass mit steigender prozentualer Belüftung die verbrauchte Luftmenge ebenfalls steigt. Bei der 60 %igen Belüftung liegt allerdings der Fall vor, dass die durchschnittlich verbrauchte Luftmenge pro Stunde deutlich geringer ist. Dies ist damit zu erklären, dass die Ammoniumwerte in dieser Zeit im Zulauf sehr niedrig waren und deshalb die Belüftung der Membranen in höheren Bereichen seltener zum Einsatz kam. Direkt vergleichbar sind die NH_4 -Regelungen im Zeitraum mit Air-Cycling. Hieraus ist ersichtlich, dass in Periode 6 insgesamt eine geringere Luftmenge verbraucht wurde ($12,17 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) als in Periode 7 mit Air-Cycling ($14,4 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$).

Durch diese durchschnittlichen stündlichen Werte zeigt sich, dass durch die NH_4 -basierten Regelungen Luftmenge – und damit letztlich auch Energie – eingespart wird, spezifisch am meisten in Periode 7.1.

Bisher wurden nur die stündlichen Durchschnittswerte der verschiedenen Regelungen betrachtet, nun wird auf den Gesamtverbrauch der Luftmenge eingegangen.

Tab. 14: relativer Luftmengenverbrauch der unterschiedlichen Regelungen

Periode	Luftmenge Nitrifikation [Nm^3]	Luftmenge Membrantank [Nm^3]	Gesamtluftmenge [Nm^3]
3	219	5933	6152
6	16	2919	2935
7 mit Air-Cycling	11	3576	3587

Um die Gesamtluftmengenverbräuche der unterschiedlichen Regelungen miteinander vergleichen zu können, wurde jeweils ein Zeitraum von 12 Tagen gewählt, an denen die Regelungen stabil liefen. Es wurden genau 12 Tage ausgewertet, da dies die höchste Anzahl an Tagen war, an denen die Periode 7 mit Air-Cycling stabil lief. In Tabelle 17 wird ersichtlich, dass während der Sauerstoff-basierten Regelung insgesamt mit Abstand am meisten Luftmenge verbraucht wurde, gefolgt von der „feedforward control“ Steuerung und schließlich am wenigsten bei der „feedback control“ Regelung.

- Energieverbräuche

Nun werden die Energieverbräuche ermittelt. Der Verdichter der Nitrifikation hat einen Stromverbrauch von 0,18 kW bei einer Luftförderleistung von $5,7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Der Verdichter des Filtrationstanks hingegen verbraucht 1,1 kW Strom, wenn der Verdichter für eine Stunde mit maximaler Leistung von 25 m^3 arbeitet (Tab.18).

Tab. 15: Stromverbrauch der verschiedenen Belüftungen

	Stromverbrauch [kW]	Luftförderleistung [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$]
Verdichter Nitrifikationstank	0,18	5,7
Verdichter Filtrationstank	1,1	25

Dies bedeutet, wenn der Frequenzumrichter der Nitrifikation beispielsweise $2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ fördert, wird

$$\frac{2}{5,7} \cdot 0,18 \text{ kW} \quad (7)$$

Strom verbraucht. Um daraus den spezifischen Energieverbrauch für die Belüftung zu errechnen, wird der Stromverbrauch pro m^3 behandelten Abwassers berechnet.

Auf dieser Basis, wurden die Strom- und Energieverbräuche der einzelnen Zeiträume berechnet.

Tab. 16: Strom- und spezifische Energieverbräuche der verschiedenen Perioden

Periode	Stromverbrauch Nitrifikation [kW]	Stromverbrauch Membrantank [kW]	Spezifischer Energieverbrauch [$\text{kWh} \cdot \text{m}^{-3}$]
3	0,07	0,97	$2,8 \cdot 10^{-6}$
6 + 7	0,02	0,59	$3,33 \cdot 10^{-6}$
6	0,03	0,49	$2,7 \cdot 10^{-6}$
7	0,01	0,59	$3,48 \cdot 10^{-6}$
7 mit Air-Cycling	0,02	0,59	$5,74 \cdot 10^{-6}$
7 ohne Air-Cycling	/	1,3	$1,96 \cdot 10^{-5}$
7.1	/	0,52	$6,56 \cdot 10^{-6}$

7.2	/	0,73	$3,57 \cdot 10^{-5}$
7.3	/	1,6	$6,22 \cdot 10^{-5}$
7.4	/	1,4	$6,99 \cdot 10^{-5}$
7.5	/	1,2	$4,45 \cdot 10^{-5}$

Der Stromverbrauch zeigt bei der Betrachtung der gesamten Zeiträume, dass sowohl in der Nitrifikation als auch dem Membrantank mehr Strom während der O₂-basierten Regelung, als während der NH₄-basierten Regelung verbraucht wurde. Die NH₄-basierte Regelung „feedback control“ verbraucht im Membrantank weniger Energie, aber in der Nitrifikation mehr als die „feedforward control“ Steuerung. Einen großen Einfluss auf den Stromverbrauch hat das Air-Cycling. Dafür muss aufgewogen werden, ob die dadurch gewonnene Energieeinsparung, das Risiko der Deckschichtbildung überwiegt. Deutlich wird ebenfalls, dass mit höherwerdender Prozentzahl der Belüftung der Membranen ebenfalls der Stromverbrauch steigt. Der spezifische Energieverbrauch kann nicht direkt miteinander verglichen werden, da in den unterschiedlichen Perioden nicht die gleichen Abwassermengen behandelt wurden.

Prozentual gesehen, wurde in Periode 6 50 % weniger Strom verbraucht als in Periode 3 und Periode 7 mit Air-Cycling war um 41, 4 % stromsparender.

5.6. Betriebserfahrung mit den NH₄- und NO₃-Online-Messgeräten

Die größte Fehlerquelle liegt bei der Messtechnik. Die Kartuschen der ISE-Sonden sollen laut Hersteller alle 9 Monate ausgetauscht werden. Da die Anlage seit März 2021 in Betrieb genommen wurde, wurde diese Zeit eingehalten. Nachdem allerdings nach dem Wechsel der Kartusche der AN-ISE sc Sonde im Ablauf gewechselt Erfolge in der Messgenauigkeit erzielt wurden, hätte in Betracht gezogen werden können, diese ebenfalls bei der AISE sc Sonde im Zulauf und der Nitrifikation auszutauschen.

Wenn bei der AISE sc Sonde die Kalibrierung während des Wechsels zwischen belüfteter und unbelüfteter Phase durchgeführt wurde, waren die Messergebnisse danach sehr ungenau. Bei der ANISE sc Sonde bestand das Problem, dass sie unter 5 mg·L⁻¹ ungenaue Messwerte liefert. Außerdem müssen hier, für der 2-Punkt-Kalibrierung, die Werte um einen Faktor von fünf auseinander liegen, was erst ab November berücksichtigt wurde. Bei der Ammonium-Messung sorgt Kalium und bei der Nitrat-Messung Chlorid für Störeinflüsse, wodurch die

Messwerte ebenfalls verfälscht werden können. Durch eingebaute Elektroden sollen diese Einflüsse kompensiert werden, was aber mit zunehmendem Alter der Sonden immer weniger zuverlässig funktioniert.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Prozessüberwachung von Membranbioreaktoren durch Einsatz moderner Messtechnik lag der Fokus dieser Arbeit auf der praktischen Anwendung einer Ammonium-basierten Sauerstoffregelung zur Betriebsoptimierung im Pilotmaßstab. Es wurde überlegt, inwieweit die Ammonium-basierte Sauerstoffregelung für MBR-Technik umgesetzt werden kann, so dass eine sichere Stickstoffeliminierung durchgeführt wird, die Belüftung optimiert und dadurch Energie eingespart wird.

Es wurde als erstes zum Vergleich die Sauerstoff-basierte Regelung getestet. Danach startete die Ammonium-basierte Regelung. Diese wurde als erstes mit der „feedback-control“-Regelung begonnen. Die Labormessungen legten dar, dass die Ablaufqualität in Bezug auf die Ammoniumkonzentration hervorragend war, im Gegensatz dazu die Nitratkonzentration aber verbessert werden muss. Da die AISE sc Sonde in der Nitrifikation und die AN-ISE sc Sonde im Ablauf aber keine zuverlässigen Daten lieferten, um die Belüftung der Nitrifikation exakt der Ammoniumkonzentration im Ablauf anzupassen und dadurch die Stickstoffeliminierung optimal zu sichern, musste eine andere Lösung für die Ammonium-basierte Sauerstoffregelung gefunden werden. Aufgrund der verlässlichen Ammoniumdaten im Zulauf wurde diese in Form einer „feedforward-control“-Steuerung umgesetzt. Sie ist stark abhängig von den Zulaufwerten. Wenn dort die Ammoniumwerte niedrig sind, muss weniger belüftet werden. Durch die bessere Verlässlichkeit der Messungen der AISE sc Sonde im Zulauf konnte diese Steuerung mit mehr Erfolg durchgeführt werden. Bei stabilem Betrieb der Pilotanlage lagen die Ablaufwerte der Labormessungen, bezogen auf die Ammoniumwerte, eindeutig unter den Grenzwerten. Da die Nitratkonzentration aber ein ebenso wichtiger Indikator für die Ablaufqualität ist, musste diese ebenfalls analysiert werden. Dies zeigte, dass keine der Regelungen eine optimale Ablaufqualität lieferte.

Die Betrachtung der Belüftung zeigte, dass durch die Ammonium-basierte Regelung sowohl in der Nitrifikation als auch bei der Belüftung der Membranen Luftmenge und somit auch Energie eingespart wurde, wie auch beim Beispiel des MBR Nordkanal, womit das Ziel der Optimierung der Belüftung und der einhergehenden Energieeinsparung erreicht wurde.

Das weitere Ziel, eine sichere Stickstoffeliminierung durchzuführen, ist hingegen nicht immer gewährleistet, weshalb dafür in Zukunft noch andere Regelungsmöglichkeiten getestet werden sollten z.B. die Redoxpotenzial-basierte Regelung. Eine weitere Möglichkeit, um noch bessere Nitrat-Ablaufwerte und weitere Energieeinsparung zu erreichen, ist, die Ammonium-basierte Regelung noch mit einer Nitrat-basierten Regelung zu kombinieren. Diese wird über die Rezirkulation reguliert.

7. Literaturverzeichnis

Barfüßer, S. D. (2018):

Energieeinsparung bei Belebtschlammverfahren durch NH₄- und O₂-basierte Regelung.

Bate, B. (2009):

Spezialgebiete der Steuer- und Regelungstechnik: PID - Einstellregeln [Schriftliche Ausarbeitung]. FH Dortmund.

Baumgarten, G. (1998):

Behandlung von Deponiesickerwasser mit Membranverfahren - Umkehrosmose, Nanofiltration [Dissertation]. Universität Hannover, Hannover.

Baumgarten, S. (2007):

Membranbioreaktoren zur industriellen Abwasserreinigung [Dissertation]. Technische Hochschule Aachen.

Bayerisches Landesamt für Umwelt. (2013):

Verfahren der biologischen Abwasserreinigung. Technik der kommunalen Kläranlagen in Bayern.

Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch den Bundesminister der Justiz (Hrsg.). (2022, 6. Februar):

Anhang 1 AbwV - Einzelnorm. http://www.gesetze-im-internet.de/abwv/anhang_1.html

Dr. Alex, J. D., Morck, T. D. & Cybulski, B. D.-I. (2017):

Simulationsgestützter Entwurf, Analyse und virtuelle Inbetriebnahme von Ammoniumregelungen für Belebungsanlagen.

Drensla, K. D.-I. (2015):

Abschlussbericht zum Vorhaben: Energetische Optimierung der Membrankläranlage Nordkanal.

Drensla, K. D.-I. & Janot, A. D.-I. (2015):

Membrantechnik als energieeffiziente, wirtschaftliche und zukunftssträchtige Technologie.

DWA. (o.D.). Formelsammlungabwasser.

DWA. (2014):

Membran-Bioreaktor-Verfahren (MBR-Verfahren) (2014. Aufl.). DWA-Regelwerk: M 227. DWA.

DWA. (2016):

Automatisierung von einstufigen Belebungsanlagen (2016. Aufl.). DWA-Regelwerk: A 268. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall.

- Förstner, U. P. D. & Köster, S. P. D. (2018):
Umweltschutztechnik.
- Grabl, V. (1998):
Optimierung der Denitrifikation mit einer externen C-Quelle [Diplomarbeit].
Technische Hochschule Mittelhessen.
- Grinwis, S. D.-I. (2008):
Weitergehende Reinigung in kommunalen Kläranlagen mittels MBR-
Technologie [Abschlussbericht], Aachen.
- Gujer, W. (2007):
Siedlungswasserwirtschaft: Mit 84 Tabellen (3., bearb. Aufl.). Springer.
http://digitale-objekte.hbz-nrw.de/webclient/DeliveryManager?pid=1641181&custom_att_2=simple_viewer
- HACH Company/HACH Lange GmbH. (2017):
LDO Sensor.
- HACH Company/HACH Lange GmbH. (2018):
AN-ISE sc Sensor.
- Häck, M. D. (o.D.):
Optische Messung der Sauerstoffkonzentration im Wasser.
- Heuermann, R. (2017):
Handbuch OPUS.
- Jianyu, S., Peng, L., Xiaoxu, Y., Kuichang, Z., Kang, X., Junlin, X., Yong, Q.,
Qing, W., Shijia, W., Xia, H., Meng, Q. & Xianghua, W. (2021):
The MBR Site: Reducing process aeration energy consumption in MBRs.
- Krebber, K. N. (2013):
Optimierung der Energiebilanz von Membranbioreaktoren [Dissertation].
Technische Hochschule Aachen.
- Lindtner, S. D. (2007):
Steuerung der Belüftung: Regelungstechnische Grundlagen.
- Londong, J. (2020):
MSR-Konzepte für Kläranlagen- Eine Einführung.
- MARTIN Membrane Systems AG. (2015):
siClaro® FM 622.
- MARTIN Systems. (o.D.):
Getauchte Module für Membran-Bio-Reaktoren (MBR).
- Masch, J. (2020):
Stickstoff in Oberflächengewässern: Nitrat, Nitrit, Ammonium, Ammoniak.
- Medinilla, V. R., Sprague, T., Marseilles, J., Burke, J., Deshmukh, S.,
Delagah, S. & Sharbatmaleki, M. (2020):

Impact of Ammonia-Based Aeration Control (ABAC) on Energy Consumption.

Melin, T. & Rautenbach, R. (2007):

Membranverfahren. Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung. (3. aktualisierte und erweiterte Auflage). Springer-Verlag.

Olsson, G. & Newell, B. (1999):

Wastewater Treatment Systems Modelling, Diagnosis and Control. IWA-Publishing.

Pinnekamp, J. U.-P. D.-I. & Friedrich, H. D. r. n. (Hrsg.). (2003):

Membrantechnik für die Abwasserreinigung (Bd. 1). FiW Verlag.

Pütz, P. D.-I. (2012):

Stickstoff-Parameter: Nitrifikation, Denitrifikation & Co.

Regmi, P., Bunce, R., Miller, M. W., Park, H., Chandran, K., Wett, B., Murthy, S. & Bott, C. B. (2015):

Ammonia-based intermittent aeration control optimized for efficient nitrogen removal. *Biotechnology and bioengineering*, 112(10), 2060–2067. <https://doi.org/10.1002/bit.25611>

Rosso, D., Larson, L. & Stenstrom, M. (2008):

Aeration of Large-Scale Municipal Wastewater Treatment Plants: State of the Art.: *Water Science & Technology*.

Schönberger, D. D.-I. (2003):

Regelungstechnische und verfahrenstechnische Maßnahmen zur Leistungssteigerung kommunaler Abwasserreinigungsanlagen [Dissertation]. Universität Siegen.

Sölter, K. & Schulz, F. (2020):

Die Bedeutung der Schlammbelastung und des Schlammalters für die Biologie von Belebtschlammanlagen - ein Erfahrungsbericht. <https://klaerwerk.info/fachwissen/abwasserreinigung/die-bedeutung-der-schlammbelastung-und-des-schlammalters-fuer-die-biologie-von-belebtschlammanlagen-ein-erfahrungsbericht/>

Tränkle, H.-R. & Reindl, L. (2014):

Sensortechnik. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29942-1>

Uprety, K., Balzer, W., Baumler, R., Duke, R. & Bott, C. (2015):

Implementation of Ammonia-Based Aeration Control (ABAC) at full-scale Wastewater Treatment Plants. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2015(19), 5857–5868.

<https://doi.org/10.2175/193864715819538624>

8. Anhang

Im Folgenden sind die Einstellungen der Belüftungsregelung der Nitrifikation und des Ablaufs der verschiedenen Zeiträume aufgelistet.

Tab. 17: Einstellung der Belüftung der Nitrifikation und des Ablauf 18.10.2021–09.11.2021

Belüftung in der Nitrifikation O ₂ -Sollwert [mg·L ⁻¹]	Ammonium mehr als [mg·L ⁻¹]	Ammonium bis... [mg·L ⁻¹]
Verdichter aus	0,0	15,0
0,5	15,0	17,5
1,0	17,5	20,0
1,5	20,0	22,5
2,0	22,5	25,0
2,5	25,0	n.A.
Belüftung in der Nitrifikation O ₂ -Sollwert [mg·L ⁻¹]	Ammonium im Ablauf mehr als [mg·L ⁻¹]	
2,0	2,0	

Tab. 18: Einstellung der Belüftung der Nitrifikation und des Ablaufs 09.11.2021–24.11.2021

Belüftung in der Nitrifikation O ₂ -Sollwert [mg·L ⁻¹]	Ammonium mehr als [mg·L ⁻¹]	Ammonium bis... [mg·L ⁻¹]
Verdichter aus	0,0	15,0
0,5	15,0	17,5
1,0	17,5	20,0
1,5	20,0	22,5
2,0	22,5	25,0

2,5	25,0	n.A.
Belüftung in der Nitrifikation O₂-Sollwert [mg·L⁻¹]	Ammonium im Ablauf mehr als [mg·L⁻¹]	
0,5	5,0	

Tab. 19: Einstellung der Belüftung der Nitrifikation und des Ablaufs ab dem 25.11.2021

Belüftung in der Nitrifikation O₂-Sollwert [mg·L⁻¹]	Ammonium mehr als [mg·L⁻¹]	Ammonium bis... [mg·L⁻¹]
Verdichter aus	0,0	22,5
0,5	22,5	25,0
1,0	25,0	27,5
1,5	27,5	30,0
2,0	30,0	32,5
2,5	32,5	n.A.
Belüftung in der Nitrifikation O₂-Sollwert [mg·L⁻¹]	Ammonium im Ablauf mehr als [mg·L⁻¹]	
0,5	5,0	

Es folgt die Auflistung der Einstellung der Belüftung des Membrantanks zu den verschiedenen Zeitpunkten der „feedforward control“ Steuerung:

Tab. 20: Einstellung der Belüftung des Membrantanks 17.11.2021–29.11.2021 und 07.12.2021–13.12.2021 ohne Air-Cycling

Belüftung im Membrantank	Ammonium Zulauf	
40 % (11,5 Nm ³ ·h ⁻¹ , 30/30 s)		<= 65 mg·L ⁻¹
45 % (13,0 Nm ³ ·h ⁻¹ , 30/30 s)	> 65 mg·L ⁻¹	<= 70 mg·L ⁻¹
50 % (14,3 Nm ³ ·h ⁻¹ , 30/30 s)	> 70 mg·L ⁻¹	<= 75 mg·L ⁻¹
55 % (15,8 Nm ³ ·h ⁻¹ , 30/30 s)	> 75 mg·L ⁻¹	<= 80 mg·L ⁻¹

60 % (17,2 Nm ³ ·h ⁻¹ , 30/30 s)	> 80 mg·L ⁻¹	<= 85 mg·L ⁻¹
65 % (18,7 Nm ³ ·h ⁻¹ , 30/30 s)	> 85 mg·L ⁻¹	

Tab. 21: Einstellung der Belüftung des Membrantanks 29.11.2021–03.12.2021

Belüftung im Membrantank	Ammonium Zulauf	
60 % (30/30 s)		<= 65 mg·L ⁻¹
65 % (30/30 s)	> 65 mg·L ⁻¹	<= 70 mg·L ⁻¹
70 % (30/30 s)	> 70 mg·L ⁻¹	<= 75 mg·L ⁻¹
75 % (30/30 s)	> 75 mg·L ⁻¹	<= 80 mg·L ⁻¹
80 % (30/30 s)	> 80 mg·L ⁻¹	<= 85 mg·L ⁻¹
85 % (30/30 s)	> 85 mg·L ⁻¹	

Tab. 22: Einstellung der Belüftung des Membrantanks 03.12.2021–06.12.2021

Belüftung im Membrantank	Ammonium Zulauf	
60 %		<= 65 mg·L ⁻¹
65 %	> 65 mg·L ⁻¹	<= 70 mg·L ⁻¹
70 %	> 70 mg·L ⁻¹	<= 75 mg·L ⁻¹
75 %	> 75 mg·L ⁻¹	<= 80 mg·L ⁻¹
80 %	> 80 mg·L ⁻¹	<= 85 mg·L ⁻¹
85 %	> 85 mg·L ⁻¹	

Tab. 23: Einstellung der Belüftung des Membrantanks 06.12.2021–07.12.2021

Belüftung im Membrantank	Ammonium Zulauf	
50 %		<= 65 mg·L ⁻¹
55 %	> 65 mg·L ⁻¹	<= 70 mg·L ⁻¹
60 %	> 70 mg·L ⁻¹	<= 75 mg·L ⁻¹
65 %	> 75 mg·L ⁻¹	<= 80 mg·L ⁻¹
70 %	> 80 mg·L ⁻¹	<= 85 mg·L ⁻¹
75 %	> 85 mg·L ⁻¹	

Tab. 24: Übersicht der Laborwerte

Datum	NH ₄ -N Zu lauf [mg·L ⁻¹]	NH ₄ -N Nitrifika tion [mg·L ⁻¹]	NH ₄ -N Ablauf [mg·L ⁻¹]	NO ₃ -N Ablauf [mg·L ⁻¹]	CSB Zulauf [mg·L ⁻¹]	CSB Ablauf [mg·L ⁻¹]
17.06.2021	70,4	1,65	< 0,015	35	949	
21.06.2021	68,7	< 0,015	< 0,015	32,7	732	36,2
24.06.2021	69,1	< 1	< 0,015	36,2	818	32,4
01.07.2021	51,6	0,486		20,7	575	173
05.07.2021	56,8	0,403		36	748	32,2
08.07.2021	61	0,086		12,4	600	34,6
12.07.2021	79	0,913		11,4	703	84,4
15.07.2021	59,8	0,084		12,1	672	31,4
19.07.2021	62,8	0,349		24,1	655	19,9
26.07.2021	59,2	0,542	0,22	31,2	607	34,1
29.07.2021	82,4	1,82		33,2	644	32
02.08.2021	62,4	1,54	0,05	39,2	463	29,7
05.08.2021	63,9	1,35	0,038	37,2	803	29,9
09.08.2021	62,2	0,063	0,038	32,5	813	31,3
12.08.2021	72,5	0,23	0,055	34,4	750	24,6
16.08.2021	60,9	7,7	< 0,015	32,1	739	24,9
19.08.2021	60,5	< 0,015	< 0,015	39	643	
23.08.2021	53,2	0,114	< 0,015	34,3	551	32,5
26.08.2021	70,9	0,834	< 0,015	34,1	521	27,8
30.08.2021	53,2	0,102	< 0,015	34	801	28,1
02.09.2021	64,2	3,57	< 0,015	15,4	691	30,8
06.09.2021	65,9	8,46	< 0,015	10,7	749	26,9
09.09.2021	60,4	4,51	0,035	23,4	557	29,8
13.09.2021	61,3	7,23	< 0,015	18,4		
16.09.2021	59,4	8,63	< 0,015	20,9	612	29,9
20.09.2021	71,1	7,55	< 0,015	22,4	630	29,4
23.09.2021	69,3	8,99	0,031	9,3	836	32
28.09.2021	65,7	10,1	< 0,015	7,65	762	30,4
30.09.2021	59,3	11,6	< 0,015	11,4	591	27,7
04.10.2021	68,9	21,6	1	8,7	665	31,8
08.10.2021	65	17,2	0,007	15,8	760	27,7
11.10.2021	69,3	20,8	4,26	15	665	31,8
15.10.2021	62,7	19,1	3,73	20	677	34,1
18.10.2021	65,1	21,3	10	9,88	643	34,7
25.10.2021	66,6	1,93	< 0,015	29,8	697	33,6
29.10.2021	65	9,24	< 0,015	16	692	31
01.11.2021	66,3	25,7	16,2	6,8	723	31,1
05.11.2021	36,3	2,11	< 0,015	13,8	435	24,8

08.11.2021	57,6	7,88	< 0,015	13,7	680	28,6
12.11.2021	68,3	34,4	27,7	< 5	635	24,8
15.11.2021	63,7	5,62	< 0,015	14,3	675	31,9
19.11.2021	67,2	39,1	28,7	< 5	718	24,8
22.11.2021	62,9	5,13	< 0,015	11,7	733	27,3
26.11.2021	75,2	6,84	< 1	< 5	609	28,6
29.11.2021	68,2	5,13	< 0,015	17	680	53,7
03.12.2021	74,2	30,7	19,5	8,01	578	26,4
06.12.2021	70	13,7	< 0,015	15,1	682	28,6
10.12.2021	75,5	11,8	0,02	11,7	590	26,4
13.12.2021	71,6	9,76	< 0,015	11,3	774	18,1