

Institut für Fluiddynamik
Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V.

**„Mikroperforierte Linearbegaser für energiesparende
Sauerstoffzufuhr in
multifunktionalen (Ab)Wasserbehandlungen“**
- MILA –

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben –MILA-,
gefördert unter dem Aktenzeichen 37473/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

M.Eng. F. Ristau¹, Dr.-Ing. S. Reinecke¹, Dr.-Ing. M. Meier², Prof. Dr.-Ing. Martin
Stachowske³

¹Institut für Fluiddynamik, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V.

Air Liquide Forschung und Entwicklung GmbH²

³IWEB Institut für Wasser & Energie Bochum GmbH

Dresden, Juni 2025

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	II
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis	V
1 Zusammenfassung	- 1 -
2 Einleitung.....	- 2 -
2.1 Energieeffizienz als Voraussetzung für nachhaltige Abwasserbehandlung und Aquakulturen - 2 -	
2.2 Vorteile der Belüftung mit reduzierter Gasblasengröße	- 3 -
3 Zielsetzung.....	- 4 -
4 Projektverlauf.....	- 5 -
4.1 Vorbetrachtungen zum Projektverlauf.....	- 5 -
4.2 Fertigungsmethode für Linearbegaser	- 9 -
4.3 Projektbereich I – Technikumsversuche CLEWATEC (CWT)	- 15 -
4.3.1 Blasengrößenuntersuchungen	- 15 -
4.3.1.1 Mikroskopische Bestimmung der Lochgröße	- 15 -
4.3.1.2 Material und Methodik	- 20 -
4.3.1.3 Ergebnisse Blasengrößenuntersuchungen	- 22 -
4.3.2 Technikumsversuche CLEWATEC (CWT)	- 25 -
4.3.2.1 Material und Methodik	- 25 -
4.3.2.2 Ergebnisse DN900-Säulen	- 30 -
4.4 Projektbereich II – Aquakultur (IWEB)	- 37 -
4.5 Projektbereich III – Abwasserbehandlung (IWEB, Air Liquide).....	- 38 -
4.5.1 Druckmonitoring auf dem TECHNIKUM der EGLV	- 39 -
4.5.1.1 Vorbetrachtung Druckspülung	- 39 -
4.5.1.2 Material und Methodik	- 40 -
4.5.1.3 Ergebnisse Druckmonitoring auf dem Technikum der EGLV	- 44 -
4.5.2 Robustheits- und Betriebsmonitoring Industriekläranlage	- 49 -
4.5.2.1 Methodik	- 49 -
4.5.2.2 Ergebnisse	- 52 -
4.6 Projektbereich IV – Fouling und Beständigkeit (CWT).....	- 56 -
4.6.1 Material und Methodik Pilotversuche CLEWATEC	- 56 -
4.6.2 Ergebnisse Fouling, Beständigkeit und Eintragsverhalten CLEWATEC.....	- 62 -
4.6.2.1 Langzeitbetrieb Linearbegaser „alt“	- 62 -
4.6.2.2 Pilotversuch MILA-Begaser	- 63 -

4.7	Projektbereich V – Ergebnisbewertung	- 68 -
4.7.1	Wirtschaftlichkeitsanalyse	- 69 -
4.7.1.1	Wirtschaftlichkeitsanalyse mit den Messergebnissen der halbtechnischen Anlage - 70 -	
4.7.1.2	Modelrechnung mit den 1000-fachen Luftmengen	- 73 -
	Literaturverzeichnis	- 77 -

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: REM-Bild mit vergoldeter Oberfläche – 5 μm Lochgröße (nominell), Fokuspunkt A, Innenseite.	- 17 -
Abbildung 2: REM-Bild ohne vergoldeter Oberfläche – 30 μm Lochgröße (nominell), Fokuspunkt A, Innenseite.	- 18 -
Abbildung 3: REM-Bild ohne vergoldeter Oberfläche – 30 μm Lochgröße (nominell), Fokuspunkt A, Außenseite. .	- 18 -
Abbildung 4: REM-Bild ohne vergoldeter Oberfläche – 100 μm Lochgröße, (nominell), Fokuspunkt X, Außenseite.	- 19 -
-	-
Abbildung 5: REM-Bild ohne vergoldeter Oberfläche – 100 μm Lochgröße (nominell), Fokuspunkt X, Innenseite. .	- 19 -
Abbildung 6: Schema zum experimentellen Aufbau der Blasengrößenuntersuchungen.	- 21 -
Abbildung 7: Messergebnisse der Blasengrößenanalysen der verschiedenen Konfigurationen PA1, PA2 und S1 zusammen mit Messwerten aus der Literatur (Hasanen et al., Behnisch et al.) und Messungen einer älteren Lineabegaserkonfiguration aus einem Projektvorgänger (LB _{alt}) als Vergleichswerte.	- 23 -
Abbildung 8: Histogramm mit Blasengrößenerteilung PA1 für 0,5 sl/min (links) und 2,0 sl/min (rechts); Die linke y-Achse zeigt die Anzahl der Blasen pro Klassenbreite q_0 ; Die rechte y-Achse zeigt die Summenverteilungskurve (Q_0) der entsprechenden Blasengrößendurchmesser.	- 24 -
Abbildung 9: Histogramm mit Blasengrößenerteilung PA1 für 0,5 sl/min (links) und 2,0 sl/min (rechts); Die linke y-Achse zeigt die Anzahl der Blasen pro Klassenbreite (q_0); Die rechte y-Achse zeigt die Summenverteilungskurve (Q_0) der entsprechenden Blasengrößendurchmesser.	- 24 -
Abbildung 10: Schematischer Aufbau der DN900 Versuchsanlage.	- 27 -
Abbildung 11: Skizzen der Röhrchenanordnungen bei den Modulausführungen „Umlenkung“ (links) und „Kombi“ für die DN900 Säulen	- 28 -
Abbildung 12: Installation des Moduls „MILA – Umlenkung“ (links) und der Tellerbelüfter (rechts) in den DN900 Säulen - 28 -	- 28 -
Abbildung 13: Exemplarischer Verlauf der Gelöstsauerstoffkonzentration während eines Absorptionsversuches in den DN900 Säulen zur Bestimmung des k_{La}	- 30 -
Abbildung 14: Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse der DN900 Säulen Absorptionsversuche für den k_{La20} der verschiedene Belüfterkonfigurationen.	- 31 -
Abbildung 15: Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse der DN900 Säulen Absorptionsversuche für den $SOTR_{20,ATV}$ der verschiedene Belüfterkonfigurationen sowie die Trendlinie (schwarze Linie) aus den Versuchen von Behnisch et al. [22].	- 32 -
Abbildung 16: Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse der DN900 Säulen Absorptionsversuche für den $SSOTE_{20}$ der verschiedene Belüfterkonfigurationen und der von Behnisch et al. vorgeschlagene Effizienzspanne von 8,5 %/m – 9,8 %/m [22].	- 33 -
Abbildung 17: Gegenüberstellung der gemessenen Druckverluste während der Absorptionsversuche für die verschiedenen Belüfterkonfigurationen.	- 34 -
Abbildung 18: Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse der DN900 Säulen Absorptionsversuche für den SAE_{20} der verschiedene Belüfterkonfigurationen.	- 34 -
Abbildung 19: Gegenüberstellung der berechneten relativen Abweichungen der Parameter k_{La20} , $SOTR_{20,ATV}$, $SSOTE_{20}$ und SAE_{20} (von links oben nach rechts unten) für die lineare Konfiguration „MILA“ zu dem jeweils aufgeführten Belüftersystem; Grün: positive Verbesserung gegenüber dem als Vergleich gewählten Belüfter; Rot: Verschlechterung gegenüber dem als Vergleich gewählten Belüfter.	- 36 -
Abbildung 20: Beispielhafter Verlauf des Druckverlustes während der Vorversuche älterer Linearbegaser-röhrchen auf der Kläranlage Ottendorf-Okrilla.	- 39 -
Abbildung 21: Außenansicht (links) und Innenansicht (rechts) der Druckspüleinrichtung mit verbauten Komponenten.	- 41 -
Abbildung 22: Luftbild der Versuchskläranlage der EGLV auf der Kläranlage „Emschermündung“ mit Einsatzort der Begaserröhrchen im Deni-Becken (orangener Kreis).	- 42 -
Abbildung 23: Fließschema der automatisierten Druckspüleinrichtung.	- 44 -
Abbildung 24: Druckverlust ohne Spülstöße (rot) und Massedurchflussrate (blau) der MILA-Belüftermodule auf der Versuchsanlage TECHNIKUM der EGLV.	- 46 -
Abbildung 25: Druckverlust der Spülstöße ohne Massendurchflussrate (nicht gemessen) der Belüftermodule auf der Versuchsanlage TECHNIKUM der EGLV.	- 47 -
Abbildung 26: Einzelne Verläufe aufgezeichneter Spülstöße im Zeitraum vom 27.05.2023 – 01.06.2023	- 47 -

Abbildung 27: Minimal, Durchschnitts-, und Maximalwerte einzelner Spülstöße und der daraus berechnete Mittelwert der Minima, Maxima und der Durchschnittswert der Messreihe (gestrichelte Linie).....	- 48 -
Abbildung 28: Testbecken „Nord“ der Industriekläranlage mit eingesetztem Rahmen (blau gestricheltes Quadrat), mit Standort der Sauerstoffsonde (blauer Punkt) und dem Rührwerk Mitte rechts an der rechten Brücke (oranger Pfeil). -	50 -
Abbildung 29: Bild des 6x2 m Rahmen der Silikonröhrchen auf der Industriekläranlage vor dem Einbau.....	- 51 -
Abbildung 30: Sauerstoffkonzentrationen und Druckverlust des S1-Rahmens während der zweiwöchigen Versuchsphase auf der Industriekläranlage.....	- 53 -
Abbildung 31: Detaillierter Ausschnitt von Belüftungsphasen und Auszeiten vom 29. Mai 2025, 0 – 12 Uhr.....	- 54 -
Abbildung 32: Boxplot der Sauerstoffkonzentrationsdatenreihe des MILA-Silikonrahmens „S1“.....	- 55 -
Abbildung 33: Satellitenbild der Kläranlage Ottendorf und Ort der Versuchsanlage (orangener Kreis).....	- 58 -
Abbildung 34: Versuchsanlage des CLEWATEC als Drauf- (links) und Frontsicht (rechts).....	- 58 -
Abbildung 35: Vereinfachtes Fließschema und Aufbau des Messcontainers und der Versuchstanks.....	- 60 -
Abbildung 36: Eingebaute Belüfter in den Tanks; Tellerbelüfter Tank 2 (links), MILA Tank 1 (rechts).....	- 61 -
Abbildung 37: Sauerstoff, Luftmassenvolumenstrom und Abwasserzuflussstrom der beiden Tanks.....	- 65 -
Abbildung 38: NH₄-N- und NO₃-N-Konzentrationen (linke y-achse), pH-Wert und Temperatur (rechte y-Achse)....	- 66 -
Abbildung 39: Druckverlust (ohne Wassersäule) mit Spülspitzen und Massedurchfluss für die Experimente in Ottendorf. -	- 67 -
Abbildung 40: Druckverlust (ohne Wassersäule, ohne Spülstöße) von den Belüftern „MILA“ und den eingebauten Tellerbelüftern im Vergleich.....	- 67 -

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der REM-Analysen für verschiedene Linearbegaservarianten.....	- 17 -
Tabelle 2: Messmatrix der Untersuchungen zur Blasenbildung für verschiedene Lochgrößen mit Fokuspunkten. -	20 -
Tabelle 3: Eigenschaften und untersuchte Parameter der getesteten Belüfter in den DN900 Säulen.....	- 27 -
Tabelle 4: Kennzahlen des Boxplots des Silikonrahmens „S1“.....	- 55 -
Tabelle 5: Generelle Informationen zur Kläranlage Ottendorf-Okrilla.....	- 57 -
Tabelle 6: Versuchsbedingungen der Nitrifikationsexperimente auf der Kläranlage Ottendorf.....	- 60 -
Tabelle 7: Spezifikationen des genutzten Messequipments.....	- 61 -
Tabelle 8:	- 66 -

1 Zusammenfassung

Belüftungssysteme sind ein großer Energieverbraucher in Kläranlagen (60-80 % des gesamten Stroms) und in der Aquakultur (über 15 % der Produktionskosten). Das MILA-Projekt zielte darauf ab, mikroperforierte lineare Belüfter zu entwickeln und zu validieren, um die Effizienz des Sauerstofftransports zu erhöhen, den Energieverbrauch zu senken und die Betriebskosten zu senken. Das Projekt konzentrierte sich auf die Optimierung der Belüfterkonfiguration, langfristige Leistungs- und Wirtschaftlichkeitsstudien sowie praktische Design-, Betriebs- und Wartungskriterien. Das Projekt umfasste mehrere Pakete, darunter Fertigungstechnologie, Leistungsbewertung, Anwendung in der Praxis und Betriebstests. Bei der Herstellung wurde ein UV-Laser-basiertes Verfahren zur Erzeugung von Mikroperforationen in Polymeren verwendet. Die Leistungsbewertung umfasste Tests im Labor- und Pilotmaßstab mit Hochgeschwindigkeits-Bildgebung und eine DN900 Technikumsanlage. Die Anwendung in der Praxis umfasste Dauertests, Robustheitsbewertungen und Versuche in der Abwasseraufbereitung und Aquakultur.

Das MILA-Projekt demonstrierte die hohe Effizienz von mikroperforierten linearen Belüftern sowohl in sauberem Wasser als auch im Abwasser. Eine gesteigerte Effizienz wurde mit einer um 17 % höheren Konzentration an gelöstem Sauerstoff erreicht. Die Fouling-Reduktion umfasste eine automatische tägliche Druckspülung, um einen stabilen Betrieb der PA-Belüfter zu gewährleisten. Silikonbelüfter erwiesen sich in industriellen Umgebungen als robust, während Teflon in der Aquakultur Potenzial zeigte. Das MILA-System zeigte einen klaren wirtschaftlichen Vorteil gegenüber herkömmlichen Plattenbelüftern bei geringerem Energieverbrauch und geringeren Investitionskosten.

Im Rahmen des Projekts wurde ein effizientes Belüftungssystem mit Energieeinsparpotenzial für die Wasser- und Abwasseraufbereitung entwickelt. Um den Markterfolg zu sichern, empfiehlt es sich, den Herstellungsprozess für eine bessere Reproduzierbarkeit der Lochgröße und zylindrische Lochgeometrien zu verfeinern, automatisierte Spülsysteme zu integrieren und sich auf materialspezifische Anwendungen zu konzentrieren. Die Ergebnisse des Projekts werden in Form von wissenschaftlichen Publikationen und einem Abschlussbericht der Projektpartner verbreitet.

2 Einleitung

2.1 Energieeffizienz als Voraussetzung für nachhaltige Abwasserbehandlung und Aquakulturen

Hinreichende Sauerstoffkonzentration und Durchmischung sind kritische Faktoren für den Betrieb sowohl von biologischen Abwasserbehandlungsanlagen als auch Aquakulturen. Beide Verfahren verwenden dafür energieintensive Luft- bzw. Sauerstoffeintragssysteme. Der Lufteintrag in Belebtschlammbecken macht 60 bis 80 % des gesamten Elektroenergieverbrauchs von biologischen Abwasserbehandlungsanlagen aus [1], [2]. In intensiven Aquakulturanlagen kann die Belüftung mehr als 15 % der gesamten Produktionskosten betragen [3]. Sowohl die Abwasserreinigung als auch die Aquakultur werden in Zukunft strengeren Nachhaltigkeits- und Effizienzstandards unterliegen, die nur durch eine deutliche Senkung des Energieverbrauchs erfüllt werden können [1], [4], [5].

Effiziente Belüftungssysteme für die biologische Abwasserreinigung erzielen eine Kombination aus ausreichender Sauerstoffübertragung in die flüssige Phase und einem hohen Durchmischungsgrad, um eine optimale Nutzung der Belebungsbecken für den biologischen Abbau organischer Inhaltsstoffe im Abwasser zu erreichen [6]. In ähnlicher Weise kann eine geringe Durchmischung und Sauerstoffübertragung in Fischzuchtanlagen zu Sauerstoff- und Temperaturschichtung sowie CO₂- und N₂-Anreicherung führen, wodurch innerhalb des Anlagenvolumens Totzonen entstehen und der Ertrag negativ beeinflusst wird [7].

Konventionelle Druckbelüftungssysteme sind aufgrund ihrer akzeptablen Robustheit und hinreichenden Leistungsfähigkeit die bevorzugte Lösung für die biologische Abwasserreinigung in Belebungsbecken [8] und ein zunehmend üblicher Ansatz für die Aquakultur [9]. Auf dem aktuellen Stand der Technik von Druckbelüftungssystemen liegt die spezifische Standard-Sauerstoffzufuhr in Reinwasser (engl. Specific Standard Oxygen Transfer Rate - SSOTR) bei ca. $21 \text{ gO}_2 \cdot \text{m}_{\text{Luft}}^{-3} \cdot \text{m}_{\text{Tiefe}}^{-1}$ bei einem Luftvolumenstrom von $1,5 \text{ m}_{\text{Luft}}^3 \cdot \text{m}_{\text{Becken}}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$. Das entspricht in günstigen Fällen einer spezifischen Standard-Sauerstoffausnutzung (engl. Specific Standard Oxygen Transfer Efficiency – SSOTE) von bis zu 9,8 % übertragenen Sauerstoffs pro Meter Tiefe [10]. Da Belebtschlammbecken und Aquakulturanlagen in der Regel weniger als 6 Meter tief sind, erreicht die Gesamtsauerstoffausnutzung von Druckbelüftungssystemen in Kläranlagen selten Werte über 60 %. Eine höhere Sauerstoffausnutzung kann durch die Zufuhr deutlich kleinerer Blasen nahe dem optimalen Durchmesser aufgrund einer größeren Phasengrenzfläche und einer längeren Verweilzeit erreicht werden [11].

2.2 Vorteile der Belüftung mit reduzierter Gasblasengröße

Aktuelle Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf die Steigerung der Stofftransporteffizienz über den Eintrag von Gasblasen nahe dem theoretischen Idealdurchmesser nach Mortajemi und Jameson [12]. Dieser liegt für eine Sauerstoffausnutzung von 95 % und eine Eintragstiefe von ca. 5 m in Wasser bei 0,9 mm. Solche Blasengrößen sind mit verfügbaren Standardbelüftungssystemen nicht erreichbar (typische Sauterdurchmesser zwischen 2 und 5 mm [13]). Mit mikroperforierten Begaserstrukturen ist eine Reduzierung der Gasblasengröße am Begaser auf bis zu 1,3 mm möglich [14]. Der SSOTE liegt dabei für die von den Antragstellern entwickelten mikroperforierten Linearbegasern deutlich über den zuvor benannten Richtwerten [10], [11] (siehe Abb 1.). Die langfristige Stabilität und Wirtschaftlichkeit feinblasiger Belüftungssysteme wird maßgeblich durch die Alterung und das Fouling der Belüftungselemente beeinträchtigt [8]. Die Interaktionen zwischen Belüftermaterial und Zulaufeigenschaften sowie die Beständigkeit gegenüber Reinigungsmethoden (z.B. Reinigung mit Säuren oder Drückstoßen) müssen charakterisiert werden, um die Foulingmechanismen zu identifizieren und optimale Maßnahmen gegen Fouling abzuleiten [8], [15]. Darüber hinaus hängt der Grad des Foulings stark von den anlagenspezifischen Betriebsbedingungen und Auslegungskriterien ab, wobei individuellen Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt werden sollten, um optimierten Betriebsweisen zu identifizieren [8], [10].

3 Zielsetzung

Ziele des vorgeschlagenen Projekts sind die Bestimmung optimaler Konfigurationen und Betriebsweisen von mikroperforierten Linearbegasern für höchste Effizienz und die Untersuchung deren langfristiger Wirtschaftlichkeit unter realen Betriebsbedingungen durch Dauerbetriebsversuche und Lebenszykluskostenanalysen. Das Projekt richtet sich an die Förderlinien 2 und 6 der DBU.

Detaillierte Ziele dieses Vorhabens sind:

- 1) Optimale Begaserkonfigurationen basierend auf experimentellen Untersuchungen mikroperforierter Linearbegaseranordnungen in Reinstwasser und Belebtschlamm im Abwassertechnikum des HZDR.
- 2) Charakterisierung des Foulings, der Materialbeständigkeit und des Druckverlustes von Linearbegasern beim Dauereinsatz in einem Belebungsreaktor.
- 3) Ableitung von Auslegungs-, Montage-, Betriebs- und Wartungskriterien für Linearbegaser in realen Abwasserbehandlungs- und Aquakulturanlagen.
- 4) Leistungsanalyse des optimierten Linearbegasersystems im Dauereinsatz unter realen Betriebsbedingungen unter Berücksichtigung anlagentechnischer Aspekte an drei ausgewählten Referenzanlagen zur Abwasserbehandlung und zwei Anlagen zur Aquakultur.
- 5) Lebenszykluskostenanalysen für den Transfer von Linearbegasern in die Praxis auf der Basis konzipierter Anlagen und Aufstellung von Bilanzierungen für Montage- und Betrieb.

Um die Untersuchungen zur Leistungsbewertung besser zu organisieren und den Prozess des Technologietransfers zu beschleunigen, ist der Arbeitsplan in fünf Projektbereiche (PB) unterteilt:

- **Projektbereich I:** Technikumsversuche mit verschiedenen Modulkonfigurationen in Reinstwasser und Belebtschlamm, sowie Konzeption einer Instrumentierung für Pulsbetrieb.
- **Projektbereich II:** Montage und Leistungsbewertung in Fischbecken zur Aufzucht und zur Hälterung unter Berücksichtigung von Kriterien für die intensive Aquakultur
- **Projektbereich III:** Montage und Leistungsbewertung in Belebtschlammbecken unter Berücksichtigung von Kriterien für die biologische Abwasserreinigung
- **Projektbereich IV:** Begleitende Untersuchung des Fouling an Begaseröffnungen sowie der chemischen und mechanischen Materialbeständigkeit.
- **Projektbereich V:** Gesamtergebnisbewertung auf der Grundlage von Lebenszykluskostenbewertungen und Ableitung von Kriterien für erfolgreichen Transfer in der Praxis

4 Projektverlauf

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die geleisteten Arbeiten der verschiedenen Projektpartner. Die Arbeiten umfassen Versuchsreihen im Technikum und die Validierung in Pilot- und Realanlagen von industriellen und kommunalen Betreibern. Die Darstellung der Ergebnisse orientiert sich für diesen Bericht an den im Projektantrag vorgestellten Projektbereichen (PB) und Arbeitspaketen (AP).

Der Projektpartner Abwasserverband Horlofftal (Kläranlage Florstadt) trat Ende Oktober 2022 aufgrund innerbetrieblicher Herausforderungen von seinen Projektaufgaben zurück. Die intensive Suche nach einem adäquaten Ersatz blieb in der Projektlaufzeit leider erfolglos.

Weiterhin soll an dieser Stelle noch darauf hingewiesen werden, dass in dieses Projekt zum Vergleich auch Daten aus Vorgängerprojekten mit eingeflossen sind. Es geht hier insbesondere um Daten aus Blasengrößenuntersuchungen und Absorptionsversuchen der DN900-Säulen für eine ältere Version der mikroperforierten Röhren. Diese ältere Konfiguration wird im weiteren als „Linearbegaser_{alt}“ bezeichnet. Die Vorgängerprojekte sollen einen weiteren Vergleich für die bisher erreichten herstellen. Die Daten des Linearbegaser stammen aus den Projekten „SEBAK“ des LANUV, Förderkennzeichen 17-04.02.01-9a/2014 und einem DBU-Projekt mit Bezeichnung „LEOBEL“ (AZ 30799-23).

4.1 Vorbetrachtungen zum Projektverlauf

Die Fertigung der Begaser stellte sich im Verlauf des Projekts als überaus anspruchsvoll dar. Der ursprüngliche Dienstleister der IWEB GmbH konnte die Entwicklung der Fertigungstechnologie in seiner Laser-Werkstatt nicht weiter unterstützen, so dass die Fertigung in 2022 umziehen und ein Arbeitsplatz zur Fertigung mit einem neu beschafften Gravurlaser qualifiziert werden musste. Hierbei erfolgte iterativ die Entwicklung einer Fertigungsmethode für definierte Lochdurchmesser sowie Lochanordnungen in verschiedenen Rohrmaterialien.

Das IWEB hat im Jahr 2012 mit Arbeiten zum feinblasigen Eintrag von Gasen in Flüssigkeiten begonnen. Zur damaligen Zeit kam nur Edelstahl als Material für Begaser in Frage. Mit Kunststoff waren zur damaligen Zeit wegen des Fließens des Kunststoffes auf Grund der hohen Temperaturen Bohrungsdurchmesser ab ca. 80 bis 100 µm möglich; das Kunststoffmaterial wurde solange verdampft, bis sich stabile fließfeste Ränder ausgebildet hatten. Statt Kunststoff wurde Edelstahl gewählt, der wegen der Zerstörung der kristallinen Struktur zur Korrosion führte, was sich jedoch erst etwa ein Jahr nach Einsatz der ersten Bleche herausstellte. Zudem haben Legierungszusätze und Schrotzugaben zu ungleichmäßigem Materialabtrag beim Lasern geführt, wodurch materialbedingt

in zahlreichen gefertigten Edelstahlblechen nicht durchgängig ein gleicher Durchmesser aller Bohrungen erzielt werden konnte. Die Folge: aus Bohrungen mit größeren Durchmessern trat mehr Gas mit zudem Blasen mit größeren Durchmessern aus.

Begaserrohre aus Kunststoff

Auf Grund der Ergebnisse des von der DBU geförderten Projekts („LEOBEL“ (AZ 30799-23).) mit Edelstahlbegasern sowohl als Blech als auch als Rohr und den daraus erkannten Perspektiven für den feinblasigen Eintrag mit Mikroperforation wurde weiter nach Lösungen mit Kunststoff gesucht.

Materialwahl Kunststoff

In Gesprächen mit Klärwärtern stellte sich neben dem Druckverlust die Lebensmittelverträglichkeit als ein sehr wichtiges Akzeptanzkriterium heraus. Damit waren die beiden relevanten Kriterien für das zur Fertigung von mikroperforierten Begasern einsetzbare Material Kunststoff festgelegt:

- a) Lebensmittelverträglichkeit,
- b) Bearbeitbarkeit mit einem Laser,
- c) Sauerstoff- und ozonresistent.

Nach ausführlichen Recherchen fiel auf Basis von allgemein zugänglichen Herstellerangaben die Wahl auf die Materialien Polyamid (PA), Silikon (S) und Teflon (PTFE).

Diese Materialien wurden in dem marktüblichen Rohr-Maß Außendurchmesser (AD) 6mm x Innendurchmesser (ID) 4 mm und nach Untersuchungen von PA AD 6mm x ID 5mm für PA und Teflon mit den Maßen AD 6mm x ID 5mm eingesetzt. Für PA wurde beim Hersteller eine Matrix für die Fertigung von Rohren mit dem Maß AD 6mm x ID 5mm für rd. 3.800 € beschafft, Teflon wird ist mit diesem Maß marktüblich beziehbar. Silikonrohre mit dem Maß AD 6mm x ID 5mm sind aus statischen Gründen ungeeignet.

Laserauswahl

Erste Arbeiten zur Perforation von Kunststoffrohren wurden wie auch mit Edelstahl mit IR-Lasern von Laserfirmen durchgeführt. Hierzu wurden Rohre mit Längen zwischen 0,3 m und 1,0 m in Halterungen eingespannt und die Halterungen wurden mit einer von den Firmen speziell gefertigten Führung unter dem Laser geführt, um das jeweilige Rohr für die einzelnen Bohrungen in Position zu bringen. Es ist selbstredend, dass dieses Fertigungsverfahren unwirtschaftlich ist.

Von IWEB wurden nach Gesprächen und Erfahrungsaustausch mit den Firmen ein Vorschub entwickelt und gefertigt, mit dem das Rohr von der Rolle gezogen und unter dem Laser positioniert wurde, um im industriellen Maßstab zu fertigen. Wegen der Beschaffungskosten wurde das Material Polyamid eingesetzt. Nach rd. zwei Jahren von Frühjahr 2019 bis Sommer 2021 mit intermittierenden

Fertigungen, die von IWEB finanziert wurde, wurden die Arbeiten mit IR-Laser wegen nicht beherrschbarer Fertigungsschwankungen eingestellt.

In parallelen Arbeiten mit einem Laseranbieter wurde mit UV-Lasern ebenfalls mit eingespannten Rohren und mittlerweile von IWEB angepassten PA Rohren mit den Maßen AD 6mm x ID 5mm gleichmäßige Bohrungsdurchmesser erzielt, wobei Ausfälle in der Qualität durch größere Bohrungsdurchmesser nicht beobachtet wurden. Nach diesen ersten Arbeiten mit den eingespannten Rohren wurden Arbeiten mit einem weiteren von IWEB entwickelten Vorschub durchgeführt. Hierbei wurde eine Prozessstabilität erzielt.

Durchmesser Laserstrahl

Bei den zuvor genannten Arbeiten stellte sich heraus, dass der Durchmesser des Laserstrahls ein im Vergleich zu anderen Parametern des Lasers eigener fertigungsrelevanter Parameter für den erzielbaren Durchmesser einer Bohrung ist, auf den von den beauftragten Firmen keine Hinweise gegeben wurden. In Metallen kann ein kleiner Bohrungsdurchmesser als der Durchmesser des Laserstrahls erreicht werden. In Kunststoff kann ein kleinerer als der Durchmesser des Laserstrahls nicht erzielt werden. Diese Erkenntnis erklärte, weshalb bei diesen Arbeiten kein Bohrungsdurchmesser unter 40 µm erzielt werden konnte. Dieser Durchmesser wurde durch Messungen von CLEWATEC bestätigt.

Grundsätzlich wurden in diesem Projekt Lasereinstellungen erstmals von IWEB iterativ ermittelt, mit denen in Kunststoffrohre Durchmesser ab 20 µm aufwärts in Kleinserien gefertigt werden konnte, ohne dass auf Know-how von Unternehmen oder allgemein zugängliche Informationsquellen zurückgegriffen werden konnte. Auch das Institut für Lasertechnik der Ruhr Universität Bochum (Prof. Dr.-Ing. Cemal Esen) konnte in zweitägigen Tests und Einstellungsversuchen keine allgemeingültigen Hinweise für geeignete Lasereinstellungen finden.

Lasermode

Auf Grund der Erkenntnis des Einflusses des Durchmessers des Laserstrahls hat IWEB einen Laser mit einem herstellerseitig ausgewiesenen Durchmesser des Laserstrahls von 7 µm beschafft. Hierzu ist anzumerken, dass der Durchmesser des Laserstrahles bei Kunststoff nicht gleichgesetzt werden darf mit dem minimal erreichbaren Bohrungsdurchmesser.

Aufbau eines Lasermoduls

Sowohl für die Montage als auch für den Betrieb von Begasermodulen mit mikroperforierten Begaserrohren haben sich Nutenplatten mit geraden Nuten, in die die Begaserrohre eingepasst werden, bewährt.

Fertigung der Begaserrohre mit Vorschub

Bei der Fertigung mit Vorschub des Begaserrohres wird ein Abschnitt des Rohres von dem Vorschub unter dem Laser positioniert und nach dem Lasern weitergeführt. Während der Weiterführung, bei der gleichzeitig die Positionierung des nächsten Rohrabschnitts unter dem Laser erfolgt, wird der Laserprozess unterbrochen, was wiederum zu einer Verlängerung des Fertigungsprozesses führt.

Diese Fertigungsmethode erfordert sehr umfangreiche Arbeiten zur exakten Positionierung des Bohrpunktes unter dem Laser sowie zur Einstellung des Fokuspunktes. Erste Arbeiten dauerten rd. 100 Stunden, wobei ein großer nicht näher quantifizierbarer Anteil die Überprüfung der Ergebnisse in einem Aquarium und mit einem Mikroskop umfassten.

Zur Fertigung mit einem Vorschub zählt die Aufnahme und die Lagerung des gelaserten Rohres in der Weise, dass es nach der Lagerung einfach und störungsfrei für weitere Montage aufgenommen werden kann. Die gelaserten Rohre wurden aufgerollt; hierzu zählt auch die Sicherstellung, dass das aufgerollte Rohr so aufgenommen werden kann, dass die Bohrungen bei Montage in einer Nutenplatte noch oben ausgerichtet sind.

Fertigung der Begasermodule mit Portalfertigung

Die Fertigung mit Vorschub ist gekennzeichnet durch die drei Fertigungsschritte Lasern Aufnahme des Rohres, Aufnahme des Rohres nach der Laserung mit Lagerung und Aufnahme des Rohres vor der Montage in die Nutenplatte.

Bei einer Montage der Begaserrohre vor dem Lasern in die Nutenplatte und einer Führung des Lasers mit einer Portalanlage in X- und Y-Richtung und einer Positionierung des Lasers über jedem Bohrpunkt kann der Arbeitsschritt Aufnahme und Lagerung nach dem Lasern entfallen. Hierdurch entfällt das Risiko, dass das gelaserte Rohr nicht mit den nach oben ausgerichteten Bohrungen in die Nutenplatte und die Nutenplatte kann sofort dem nächsten Fertigungsschritt Montage der Gasanaschlüsse zugeführt werden; nach vorliegenden Erkenntnissen kann die Fertigungszeit um 15% bis 18% bei gleichzeitig deutlich geringeren Qualitätsrisiken reduziert werden.

Von IWEB wurde eine selbstfinanzierte Portalanlage montiert. Die Positionierung der Anlage war mit der gelieferten Software ohne zusätzlichen Aufwand und mit Unterstützung der Lieferfirma im Grunde sofort möglich.

Allerdings konnten mit der verfügbaren Ausstattung keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden. Dies wurde sowohl bei einer Laserführung über eine Fläche von 1 m x 1 m noch bei einer linearen Fläche von 1 m x 0,1 m festgestellt. Gründe hierfür sind unregelmäßige Abstände der Linse des Lasers und des Auftreffpunktes des Laserstrahls auf der Materialoberfläche als Folge von Unebenheiten in der Nutenplatte, die nur mit einem Vakuumentisch in Kombination mit einer

Höhensteuerung des Lasers zur durchgängigen konstanten Einstellung des Abstands von Linse und Materialoberfläche, dem Fokuspunkt, hätten kompensiert werden können. Die Investitionen hätten ab 45.000 € für den Vakuumentisch mit einer Fläche von 2,2 m x 1,2 m und ab 3.500 € für eine Höhensteuerung für ein Laserfeld von 40 mm x 40 mm betragen. Diese Investitionen wurden nicht getätigt.

Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass bei Einsatz der Vakuumpumpe während der Fertigungsdauer dauerhaft eine Vakuumpumpe in Betrieb sein muss; die Leistung der angefragten Vakuumpumpe für den angefragten Vakuumentisch beträgt 4 kW bei einer Lautstärke von 85 dB.

4.2 Fertigungsmethode für Linearbegaser

Bevorzugte Konfiguration für die Fertigung der mikroperforierten Begaserrohre

Nach den gewonnenen Erfahrungen eignet sich ein UV-Laser mit einem möglichst geringen Durchmesser des Laserstrahls. Das zu lasernde Rohr wird mit einem Vorschub mit Rollen abschnittsweise unter dem Laser positioniert. Eine zeitliche Optimierung der Vorschubzeiten in Koordination mit den Laserzeiten wurde nicht weiter untersucht.

Weitere Optimierung der Fertigung von Modulplatten

Die bevorzugte Konfiguration kann kombiniert werden mit einer Aufnahme des gelaserten Rohres unmittelbar nach dem Lasern und einer zeitlich nächstmöglichen Einführung des gelaserten Rohres in eine Nut der Nutenplatte. Laser und Vorschub sind stationär positioniert, während die Nutenplatte je Prozessschritt und X- oder in Y-Richtung positioniert wird.

Rohrmaterial

Nach heutigem Kenntnisstand sind eher Kunststoffrohre mit einer Wandstärke von 0,5 mm geeignet. Größere Wandstärken erhöhen die Laserzeit und hierbei bestehen größere Qualitätsprobleme, wie bei umfangreichen Beobachtungen von gelaserten Rohren in einem Aquarium festgestellt wurden; diese Ergebnisse subjektiver Beobachtungen können nicht durch Messungen belegt werden.

Ein Versuch mit auf 0,3 mm abgefräste PA Rohre wurde nicht weitergeführt. Das Material mit dieser Wandstärke würde die Laserzeit verkürzen, ist für die mechanischen Belastungen im Alltag auf einer Kläranlage jedoch ungeeignet.

Lochdurchmesser

Verschiedene Lochdurchmesser konnten nur iterativ erreicht werden. Für die Materialein PA, Silikon und Teflon sind unterschiedliche Lasereinstellung erforderlich. Die maßgeblichen Parameter Durchgang, Geschwindigkeit, Impuls und Energie sind untereinander interdependent. Durch

Veränderung von zwei Parameter kann ein etwa gleicher Blasendurchmesser – betrachtet im Aquarium - erreicht werden. Wird bspw. die Anzahl der Durchläufe erhöht und die Geschwindigkeit reduziert, kann ein etwa gleicher Blasendurchmesser erzielt werden. Es sind deutliche Unterschiede bei den Blasendurchmessern, selbst bei der Betrachtung mit Auge, erkennbar, wenn einer der beiden Parameter verändert wird. Dies gilt bei dem Ziel der kleinen Blasendurchmesser, sobald die Einstellungen im Grenzbereich der verschlossenen Bohrung liegen – eine geschlossene Bohrung ist zu definieren als eine Bohrung, bei der eine Veränderung der Oberfläche erkennbar ist, die Rohrwand jedoch nicht vom Laserstrahl durchdrungen wird. Grundsätzlich wurde festgestellt, dass für jedes Material und für jeden Durchmesser eine spezifische Lasereinstellung iterativ zu finden ist. Der Lieferant des Lasers weist darauf hin, dass die Fokushöhe auch von der Laserleistung abhängt. Der hier eingesetzte Laser hat eine Leistung von 10 W.

Reproduzierbarkeit

Die Reproduzierbarkeit war eine unerwartet große Herausforderung. Der Laser kann auf einer Fläche von 40 mm x 40 mm Bohrpunkte ansteuern. Bei einem stationären Laserbetrieb, bei dem die Rohre mit einem Vorschub in Bohrpositionen gebracht werden, wird eine Reproduktion der Bohrungen, erkennbar an den Blasendurchmessern, erreicht.

Die Auswertung einer Bohrsequenz von 10 Bohrvorgängen mit einer aktiven Strecke von 400 mm benötigt bis zur Bewertung der Bohrqualität bis zu 60 min. Diese Zeit ist erforderlich, bis sich die austretenden Blasen nach dem Austritt aus dem Bohrloch nicht mehr erst an der Rohroberfläche ausbilden und hierbei zu Beginn Blasen bis zu 5 mm Durchmesser bilden und erst langsam sich die Kontaktfläche an der Rohroberfläche reduziert, bis das Gas letztlich ohne Ausdehnung an der Oberfläche nach dem Austritt aus dem Bohrloch sofort aufsteigt.

Nach Auswertung der Ergebnisse und Erkenntnisse im Zusammenhang mit dem Portalbetrieb wird geschlussfolgert, dass ein stationärer Laserbetrieb zumindest vorläufig reproduzierbare Bohrergebnisse ergibt. Für eine höhere Produktivität ist eine nachgeordnete Anordnung einer Führung einer Nutenplatte mit einem mechanisierten Eintrag des Rohres in eine Nut die nach aktuellem Kenntnisstand wirtschaftliche Fertigungsvariante.

Rolle zu Rolle

Von einer Rolle zu Rolle Fertigung sollte abgesehen werden, da die Fassung und Führung der gelaserten Rohre aufwendig ist und im Hinblick auf die weitere Verarbeitung mit einer gesteuerten Führung und Wicklung gefasst und gelagert werden müssen, wobei eine Lösung zu finden ist, dass die Bohrungen nach dem Abrollen nach oben gerichtet bleiben.

Fertigung der Rahmen

Ein Begasermodule wird gefertigt aus der Nutenplatte, in deren Nuten die Begaserrohre eingepasst werden, sowie aus den Verteilerrohren/der Verteilerleitungen für die Luft- und/oder Gaszuführung und die Verbindungen von Begaserrohren und Verteilerrohren/Verteilerleitungen. Die Verbindungen sind auf einer Seite in die Verteilerrohre/Verteilerleitungen einzubringen und auf die Begaserrohre aufzusetzen. Diese Verbindungen können derzeit nur in Handarbeit hergestellt werden. Um diesen Aufwand für die Handarbeiten zu reduzieren, wurden Varianten der Führung der Nuten gesucht, um gleichermaßen die Anzahl der Verbindung zwischen Begaserrohren und Verteilerrohren/Verteilerleitungen zu minimieren und die Länge eines Begaserrohres oder von mehreren Begaserrohren auf einer gegebenen Fläche zu optimieren.

Das Prinzip des linearen Eintrags von Luft bzw. den Gasen Sauerstoff O_2 und Ozon O_3 bietet nach den vorliegenden Ergebnissen aus allen von der DBU geförderten Projekten sowie weiterer von IWEB durchgeführter Untersuchungen, deren Ergebnisse in die Fertigung des Projekts MILA eingebracht sind, wegen eines reduzierten Energiebedarfs durch den effizienteren Luft- und Gaseintrag einen eindeutigen ökologischen und ökonomischen Vorteil. Grundlegende Fragen zum Betrieb des Lasers sowie zur Rohrführung sind geklärt.

Nach heutigem Kenntnisstand ist zu klären, welcher lebensmittelneutrale Kunststoff für einen dauerhaften Betrieb geeignet ist.

Bekannt ist, dass mit geraden PA Rohren mit einem Durchmesser der Bohrungen ab rd. $30\ \mu\text{m}$ für den konstanten langdauernden Betrieb in kommunalen Kläranlagen ein wirtschaftlicher Vorteil gegenüber Membranbelüftern erzielt wird. Dieses Begasermodell wird von IWEB als Linearbegaser angeboten. Linearbegaser mit Durchmessern der Bohrungen $< 30\ \mu\text{m}$ zum Eintrag von kleineren Blasen, wie sie für den wirtschaftlichen Eintrag von Sauerstoff O_2 und Ozon O_3 am Markt gefordert werden, führen bei PA Linearbegasern, wie parallele Auswertung von CLEWATEC ergeben haben, kurz nach der Inbetriebnahme zu einem Anstieg der Druckverluste, die einen höheren Betriebsaufwand zur Senkung des Druckverlustes nach sich ziehen. Zudem gibt es bei PA eine nicht näher definierbare Fertigungsgrenze beim Bohrungsdurchmesser und dem damit resultierenden Blasendurchmesser, ab der statt kleinerer Blasen die Bohrungsdurchmesser verschlossen sind. Dieser Effekt des Verschlusses der Bohrung konnte trotz zahlreicher Untersuchungen und Lasereinstellungen wie dem Fokuspunkt von der Rohroberfläche in $0,1\ \text{mm}$ -Schritten bis zum Erreichen des Rohrinneins nicht überwunden werden.

Fazit des Lasers von PA Rohren: nach Auswertung der Ergebnisse in den von der DBU geförderten Projekten kann als Ergebnis festgestellt werden, dass Bohrungsdurchmessern von $30\ \mu\text{m}$ als die technische Untergrenze für einen stabilen Eintrag von atmosphärischer Luft gelten.

Bohrungsdurchmesser < 30 µm

Bei Untersuchungen zum Erreichen von Bohrungsdurchmessern u.a. mit PP, PE und PAE traten u.a. wegen der Rohrdurchmesser sowie der spezifischen Materialeigenschaften verschiedenen Probleme wie Entflammen oder lange Bohrungszeiten auf. Mit diesen Materialien werden derzeit keine Untersuchungen durchgeführt.

Silikonschlauch

Für den Eintrag von O₂ schlug der Projektpartner Air Liquide Untersuchungen mit Silikonschläuchen vor. Es waren trotz gleicher Herstellerangaben bei gleicher Schlauchgeometrie unterschiedliche Lasereinstellungen erforderlich. In mehrwöchigen Untersuchungen wurden Lasereinstellungen gefunden, bei denen Begaserrohre zerstörungsfrei und mit maximaler Reproduktion gefertigt werden konnten. Wegen des gelegentlichen Auftretens von vereinzelt Bohrungen in einem Schlauch mit einem größeren Durchmesser war jeder einzelne Schlauch zu testen, was bei einer Dauer bis zur Ausbildung der tatsächlichen Blasengröße nach Abschluss der Anlagerung austretender Blasen an der Schlauchoberfläche bis zum direkten Austritts der Luft aus dem Bohrloch von ca. 30 min zu einem zeitintensiven Fertigungs- bzw. Montageprozess führte. Es zeigte sich, dass mit Silikonschläuchen auf Grund der Elastizität des Materials variable Blasendurchmesser in Abhängigkeit vom Luftdurchsatz erzielt werden können.

Die mit dem Silikonschlauch erzielbaren Eintragungsergebnisse sowie die Effizienz dieses Begasersystems werden von CLEWATEC ausgewertet und dargestellt.

Teflonrohr

Bekanntermaßen ist Teflon ein abweisendes Material in Kombination mit einer hohen Temperaturfestigkeit und hohen chemischen Festigkeit. Seit Anfang 2025 wurden Untersuchungen mit Teflonrohr AD 6mm x ID 5mm durchgeführt. Auf Grund der hohen Temperaturfestigkeit des Teflons konnten bekannte Lasereinstellungen nicht übernommen werden. In umfangreichen Untersuchungen mit von IWEB finanziertem Material wurde erste Ergebnisse nach dem Verbrauch von rd. 600 m Laserrohr erzielt.

Mit Teflonrohr wurden in ersten Versuchen erkennbare Unterschiede bei Lasereinstellungen von 10 µm und 20 µm erreicht. Es konnte noch nicht gemessen werden, welcher tatsächliche Durchmesser im Rohr der einzelnen Einstellung von 10 µm bzw. 20 µm zuzuordnen ist. Weiter wurden in Abhängigkeit von der Lasereinstellung Blasendurchmesser wie sie sich in mit CO₂ gesättigten Flüssigkeiten wie in Mineralwasser- und/oder Sektgläsern einstellen, wenn einige Zeit nach Befüllen des Gefäßes das Ausstrippen des CO₂ dem Ende zugeht.

Insgesamt haben die bisherigen Ergebnisse den Anschein, dass unterschiedliche Blasendurchmesser in Abhängigkeit von einstellungsabhängigen Bohrungsdurchmesser erzielt werden können.

Fertigungstoleranzen

Fertigungstoleranzen konnten nicht ermittelt werden. Es wurden Beobachtungen durchgeführt, ob die Blasendurchmesser über die Länge des gelaserten Rohres gleich sind.

Qualitätsprüfung

Für eine Qualitätsprüfung sind noch Parameter und Messverfahren zu entwickeln.

Fazit Markteinführung

Mittlerweile gesichert ist, dass mit geraden parallel angeordneten Begaserrohren ein effizienterer Sauerstoffeintrag im Belebtschlamm mit atmosphärischer Luft im Vergleich mit Membranbelüftern erreicht wird. Beim Einsatz von PA liegt die betriebsstabile Untergrenze des Bohrungsdurchmessers bei 30 µm. Die mit diesem Durchmesser erzielbaren Blasendurchmesser dürften beim Einsatz von O₂ und O₃ nicht die Anforderungen an einen wirtschaftlichen Eintrag dieser teuren Gase genügen. Dort haben sich die Bohrungen in mehreren Begaserrohren beim Eintrag von O₂ kontinuierlich verschlossen.

Mit Silikon wurden zerstörungsfreie Bohrungen erreicht, mit denen Blasen mit flexiblem Durchmesser in eine Flüssigkeit eingetragen werden können. Soweit die Silikonschläuche die mechanischen Anforderungen im Betrieb – vorrangig Rissfestigkeit – erfüllen, können Linearbegaser mit Silikonschläuchen im Markt eingeführt werden. Optimierungsbedarf bestehe hinsichtlich der Gestaltung der Nuten zur Vermeidung von ev. Auftrieb. Über die endgültigen Marktchancen von Silikon beim Einsatz in Linearbegasern sollte auf Grundlage der Betriebsergebnisse von Air Liquide und deren Auswertung durch CLEWATEC nachgedacht werden.

Mit Teflonrohr liegen wichtige Erkenntnisse über die Fertigung und erste Ergebnisse über den Eintrag von Luft in einem Aquarium und in einem Gartenteich vor. Das Rohr ist im Gartenteich zum Zeitpunkt der Verfassung dieses Berichtes mit Algen bewachsen und umschlungen. Nach rd. 14 Tagen Betrieb ist der Luftdurchsatz mit einer Membranpumpe deutlich zurückgegangen. Nach Anschluss eines Air Brush Kompressors und einem einmaligen Druckstoß von 5 s treten aus allen Bohrungen Blasen mit Durchmessern aus, die dem Anschein nach den Durchmessern der Blasen bei Inbetriebnahme nach dem Einsatz in den Teich entsprechen. Mit Teflonrohr besteht nach heutigem Kenntnisstand die Möglichkeit, das Blasendurchmesser erzielt werden können wie sie in Aquakulturen gefordert werden.

Hinweis zum Forellenhof Mohnen

Die Geschäftsführung der Forellenzucht Mohnen hat großes Interesse an dem Eintrag von Sauerstoff O₂ mit Linearbegasern. Der Betrieb stellt gleichermaßen hohe Anforderungen an die Qualität der Blasendurchmesser und an die Prozessstabilität. Das Unternehmen steht unter Wettbewerbsdruck. Es verdeutlicht, dass es eine im Wesentlichen abgeschlossene Technologie einsetzt und wenig Zeit für Experimente hat. Ebenso ist es nicht bereit, Verlustrisiken als Folge des Versagens von Linearbegasern einzugehen. Diese Anforderungen haben sich im Unternehmen Mohnen im Laufe der Zeit entwickelt. Die Folge ist, dass gerade an der Reproduzierbarkeit der Bohrungen in den letzten beiden Jahren gearbeitet wurde. Vereinfacht formuliert: es ist einfach, einige Bohrungen auf einer Strecke von bis zu 40 mm bei einer Position zu lasern, aber es ist auf Grund der miteinander korrespondierenden genannten Parameter ein Prozess mit einer Mehrzahl von auf einander abzustimmender Einstellungen, die sich gegenseitig beeinflussen. Die Anforderungen des Unternehmens haben die Suche nach Lösungen immer wieder vorangetrieben.

4.3 Projektbereich I – Technikumsversuche CLEWATEC (CWT)

Die Untersuchungen zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Linearbegasern werden in DN900-Säulen im Abwassertechnikum des CLEWATEC – im Folgenden CWT – durchgeführt. Hauptziel dieser Untersuchungen ist es, die Auswirkungen ausgewählter Konfigurations- und Betriebsansätze in den hydrodynamischen Prozessen sowohl auf der integralen Skale als auch auf der Skale der Gas-Flüssig-Grenzschicht durch spezialisierte Messtechniken (insbesondere Hochgeschwindigkeitsvideometrie, Stofftransportmessung) zu identifizieren. Zur Reinigung der Begaser im Belebtschlammtrieb wurde (basierend auf Voruntersuchungen) eine Instrumentierung für regelmäßige Spülstöße konzipiert und deren Wirkung auf das Begaserverhalten analysiert.

Die Analysen werden mit Reinstwasser (Deionat) durchgeführt, um den Einfluss

- des Verhaltens der dispergierten Gasphase (Blasendurchmesser),
- Durchmesser und Abstand der Mikroperforationen,
- Anordnung der Begaserröhrchen.
- und Gasvolumenstrom durch den Begaser,

auf

- die Sauerstoffzufuhr (SSOTR) und Sauerstoffausnutzung (SSOTE),
- die Energieeffizienz (SAE) zu untersuchen.

Diese Messungen werden unter Berücksichtigung der Einflussbedingungen von Temperatur, pH-Wert, Luft- und hydrostatischem Druck und Salzkonzentration durchgeführt. Zum Vergleich wird die in CWT vorhandene Datenbasis von untersuchten Standardbelüftern aus vergangenen Messungen herangezogen. Zusätzlich wurden ein konventioneller Membranbelüfter und ein Schlauchbelüfter für direkte Leistungsvergleiche in der zweiten DN900-Säule unter den gleichen Bedingungen untersucht.

4.3.1 Blasengrößenuntersuchungen

4.3.1.1 Mikroskopische Bestimmung der Lochgröße

Begleitend zu den aufgeführten Analysen zur Blasenbildung erfolgten mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) Untersuchungen zu den Fertigungstoleranzen des Lasers. Diese liefern Aufschluss über die tatsächlich erreichten Lochgrößen, um die Qualität des Laserverfahrens in Bezug auf verschiedene Lochgrößen zu beurteilen. Untersucht wurden zum einen verschiedene Lochgrößen im Bereich von 5 μm – 100 μm . Zum anderen kann bei der Fertigung der Begaserröhrchen der Fokuspunkt des Lasers variiert werden. Für dieses Projekt wurden drei Fokuspunkte untersucht. Der Fokuspunkt kann entweder oben am Rohrscheitel angesetzt werden

(Fokuspunkt A), oder der Fokuspunkt wird mittig am Rohrscheitel fixiert (Fokuspunkt X). Außerdem kann der Laserkopf um 0,5 mm abgesenkt werden um die Bohrdistanz zum Material zu verringern (Fokuspunkt V). Die REM-Untersuchungen umfassten weiterhin eine Analyse der Lochaußenseite und der Lochinnenseite um eventuelle Unterschiede der Lochgröße von außen nach innen zu erfassen. Die einzelnen Röhren der verschiedenen Konfigurationen mussten zur Vorbereitung fürs REM zunächst in ca. 2 cm kleine Stücke geschnitten und anschließend halbiert werden. Bei der Halbierung wurde darauf geachtet, dass die Löcher auf der Oberseite liegen, wobei die untere Rohrhälfte (ohne Löcher) entfernt wurde. Dann wurden je eine Rohrrinnenwand und eine Rohraußenwand auf dem fürs REM geeigneten Probenträger fixiert. Zu erwähnen ist noch, dass zwei der Proben mit einer dünnen Goldschicht präpariert wurden. Damit wurde versucht die schlechte Leitfähigkeit des Materials zu verbessern, da mit einer erhöhten Leitfähigkeit des Materials eine bessere Bildqualität erzielt werden kann. Diese Technik wurde daher zunächst für zwei Variationen zu Vergleichszwecken angewendet um zu beurteilen, ob tatsächlich eine Verbesserung erzielt wird und diese Technik für spätere Messungen nützlich sein kann. Nachfolgend soll kurz auf ein paar ausgewählte Bilder aus dem REM eingegangen werden, um die wichtigsten Erkenntnisse aus den Analysen darzustellen.

In Abbildung 1 dargestellt ist eine Aufnahme der Lochinnenseite eines 5 µm Loches. Diese Probe wurde vorher vergoldet. Die Kontraste und Strukturen der Materialoberfläche sind auf der Aufnahme gut zu erkennen. Bei der Probenvorbereitung gab es allerdings Schwierigkeiten, da die Löcher bei dieser Variante nicht mit bloßem Auge zu erkennen waren. Daher wurde bei dieser Analyse unter dem REM festgestellt, dass nur ein Loch von der Innenseite betrachtet werden kann. Es ist zu erkennen, dass das nominelle 5 µm Loch eine tatsächliche Größe von etwa 45 µm x 33 µm besitzt. Aufgrund der Schwierigkeiten bei der Probenpräparation ist das Loch nicht ganz korrekt auf dem Probenträger fixiert worden. Dadurch entstand bei den REM-Messungen ein Winkel, welcher die Messung etwas verzerrt. Es ist anzunehmen, dass der tatsächliche Lochdurchmesser noch etwas größer ist als erfasst. Insgesamt bleibt aber festzuhalten, dass der Lochdurchmesser innen ca. 8-mal größer ist als beabsichtigt.

In Abbildung 2 – Abbildung 5 sind beispielhaft die Lochgrößen 30 µm und 100 µm, Innen- sowie Außenseite, dargestellt. Zu erkennen ist, dass sich die tatsächlichen Lochgrößen sowohl von der Innenseite als auch von der Außenseite jeweils nur minimal unterscheiden. Die Lochgröße außen beträgt für 30 µm mit Bohrrand ca. 419 µm x 433 µm bzw. 220 µm x 198 µm ohne Bohrrand. Die Lochgröße außen für 100 µm beträgt etwa 430 µm x 460 µm (mit Bohrrand) und 213 µm x 202 µm. Es ist ersichtlich, dass es bei den hier angewendeten Fertigungseinstellungen keine signifikanten Unterschiede gemäß der nominellen Lochgröße gibt. Gleiches gilt für die verschiedenen Fokuspunkte, die Lochinnenseiten, sowie für die nominelle Lochgröße 50 µm. Auch hier sind die Unterschiede in den Lochgrößen marginal. Insgesamt ließen sich die kleineren Abweichungen wohl

mit den Fertigungstoleranzen beim Laservorgang erklären. Die Ergebnisse aller REM-Untersuchungen der verschiedenen Varianten sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Übersicht der REM-Analysen für verschiedene Linearbegaservarianten.

Nominelle Lochgröße [µm]	Fokuspunkt Laser [-]	Größe Lochaußenseite [µm]	Größe Lochinnenseite [µm]	Bemerkungen
5	A - oben Rohrscheitel	-	33,2 x 44,7	Probe vergoldet
30	A - oben Rohrscheitel	418,2 - 432,9 zu 198,5 - 220,5	207,3 x 207,3	Einschnitt rechts, Loch konisch
50	A - oben Rohrscheitel	476,1 - 446,8 zu 215,3 - 243,2	213,1 x 202,9	Einschnitt rechts, Loch konisch
100	A - oben Rohrscheitel	460,0 - 429,7 zu 202,1 - 212,9	206,5 x 201,9	Einschnitt links, Loch konisch
100	X - mittig Rohrscheitel	523,7 - 493,5 zu 272,8 - 225,2	252,7 x 219,0	Einschnitt links, Loch konisch
100	V - Laserkopf 0,5 mm abgesenkt	469,7 - 457,8 zu 170,3 - 191,5	191,9 x 199,5	Einschnitt links, Loch konisch, Probe vergoldet

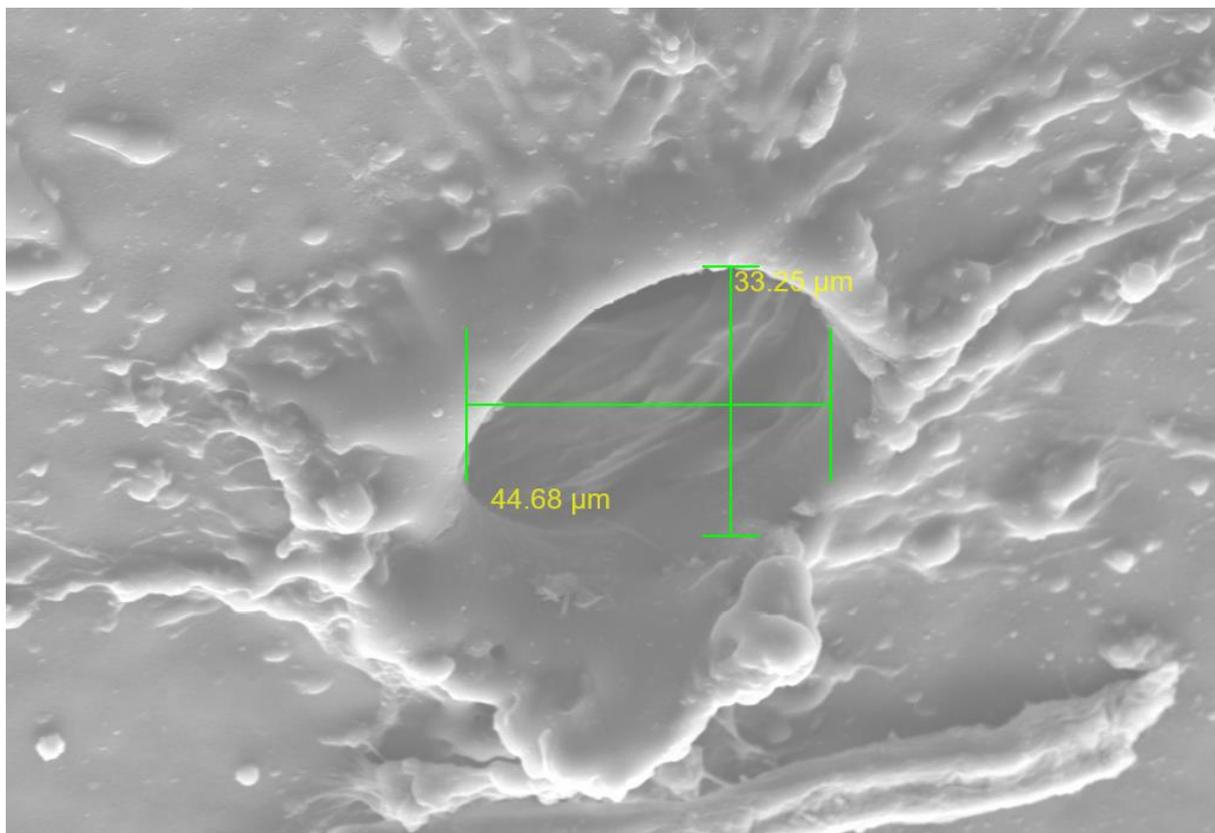


Abbildung 1: REM-Bild mit vergoldeter Oberfläche – 5 µm Lochgröße (nominell), Fokuspunkt A, Innenseite.

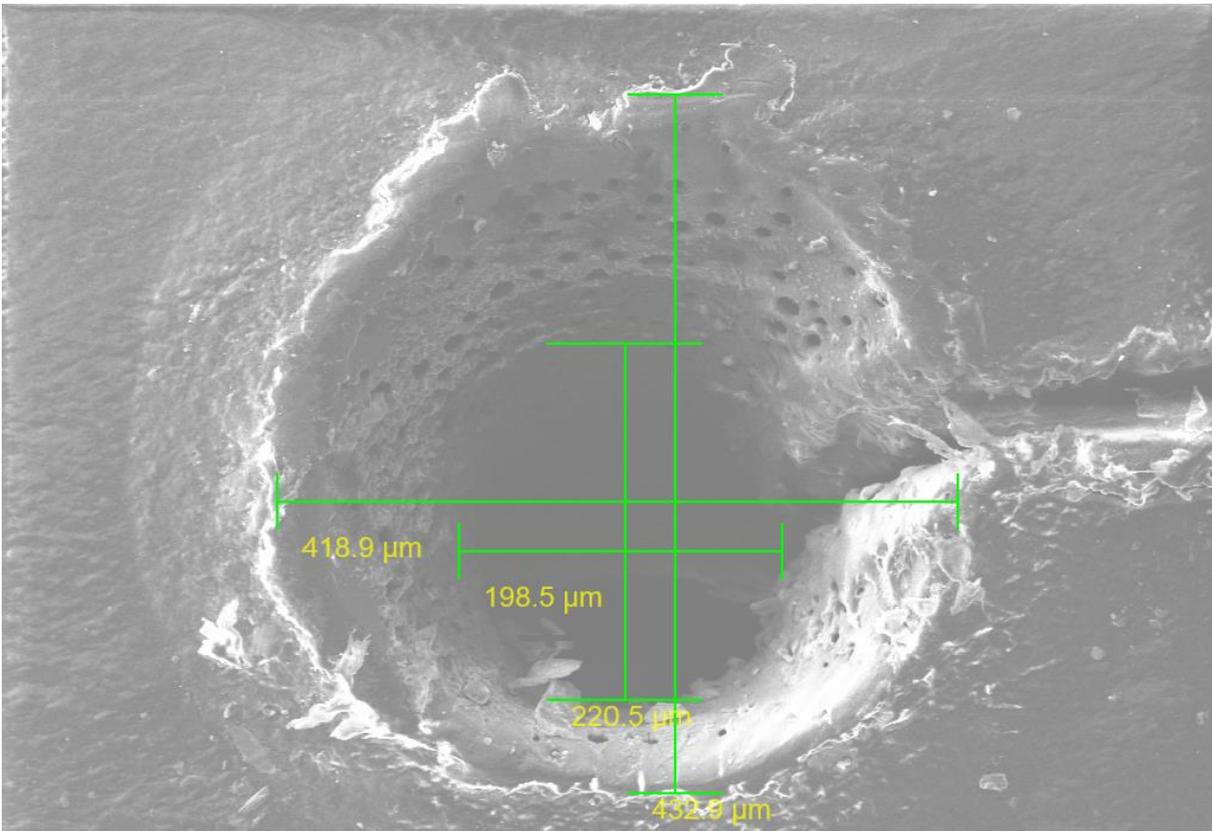


Abbildung 2: REM-Bild ohne vergoldeter Oberfläche – 30 μm Lochgröße (nominell), Fokuspunkt A, Außenseite.

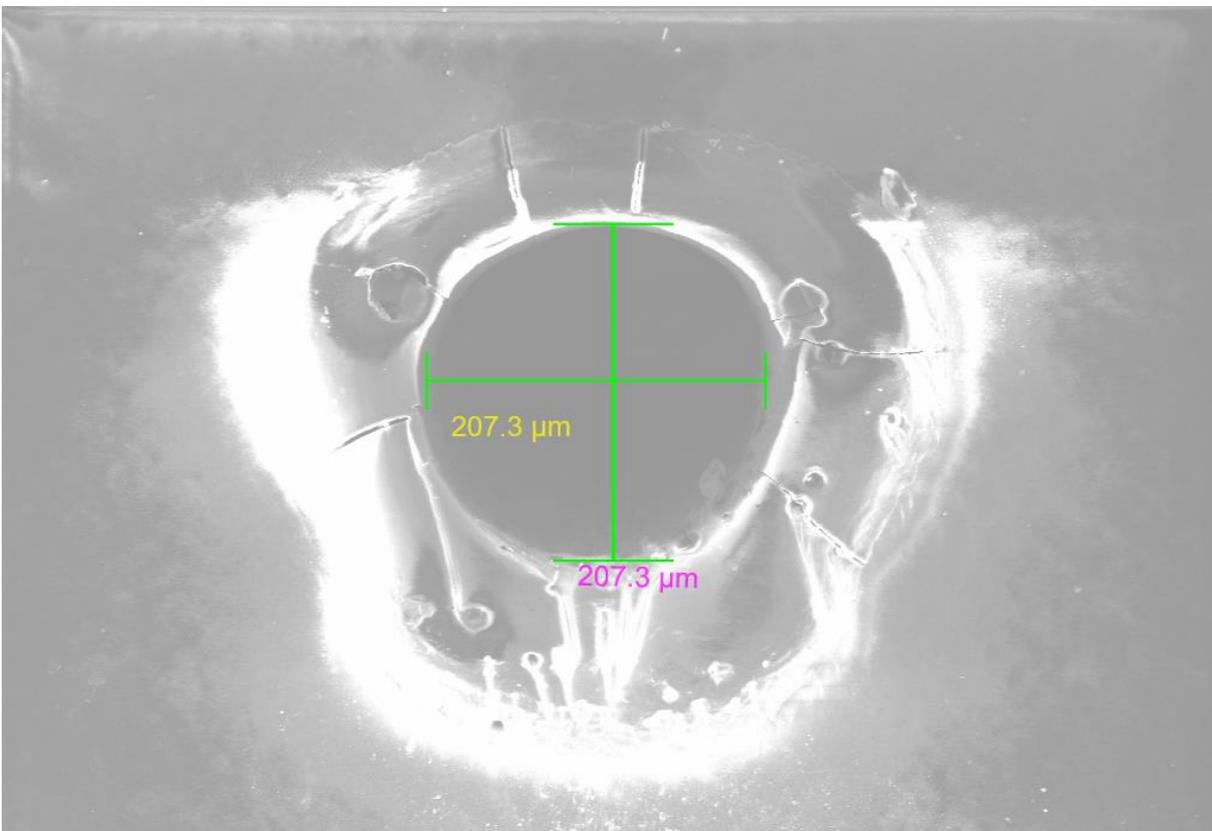


Abbildung 3: REM-Bild ohne vergoldeter Oberfläche – 30 μm Lochgröße (nominell), Fokuspunkt A, Innenseite.

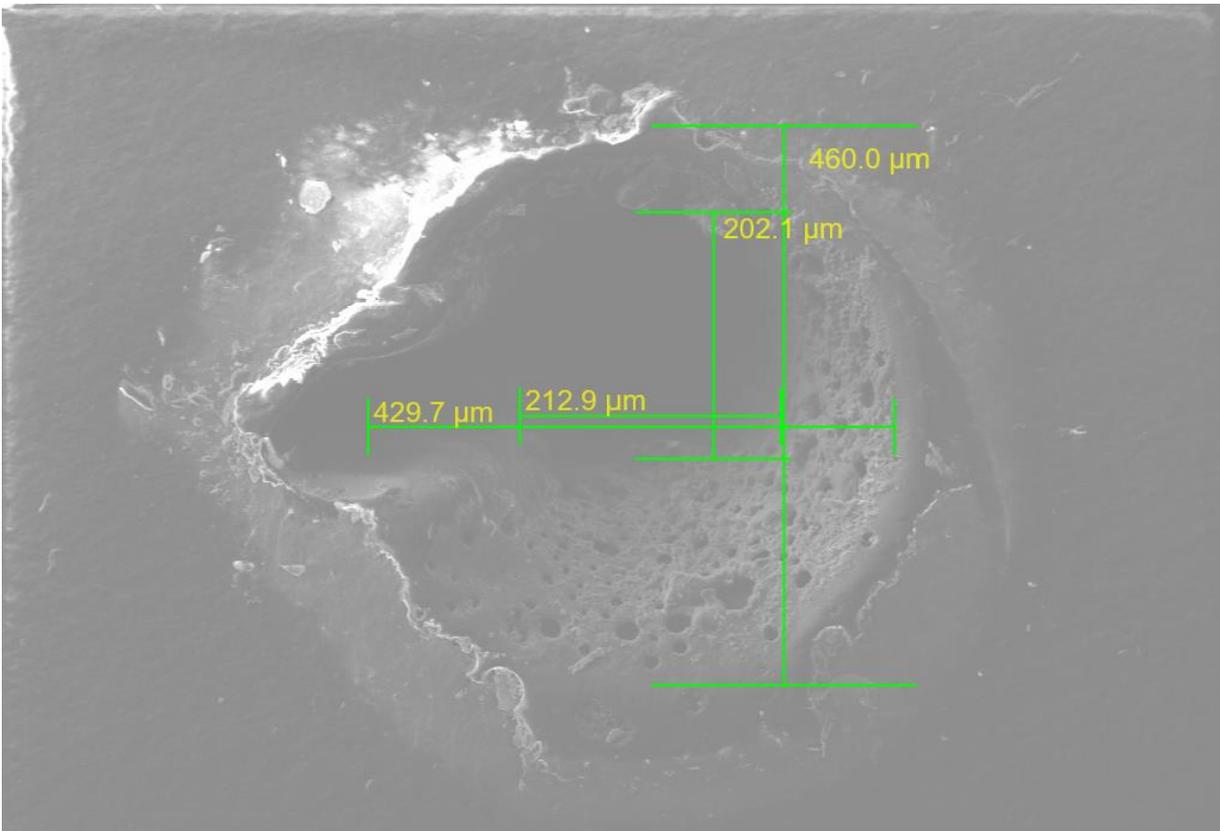


Abbildung 4: REM-Bild ohne vergoldeter Oberfläche – 100 μm Lochgröße, (nominell), Fokuspunkt X, Außenseite.

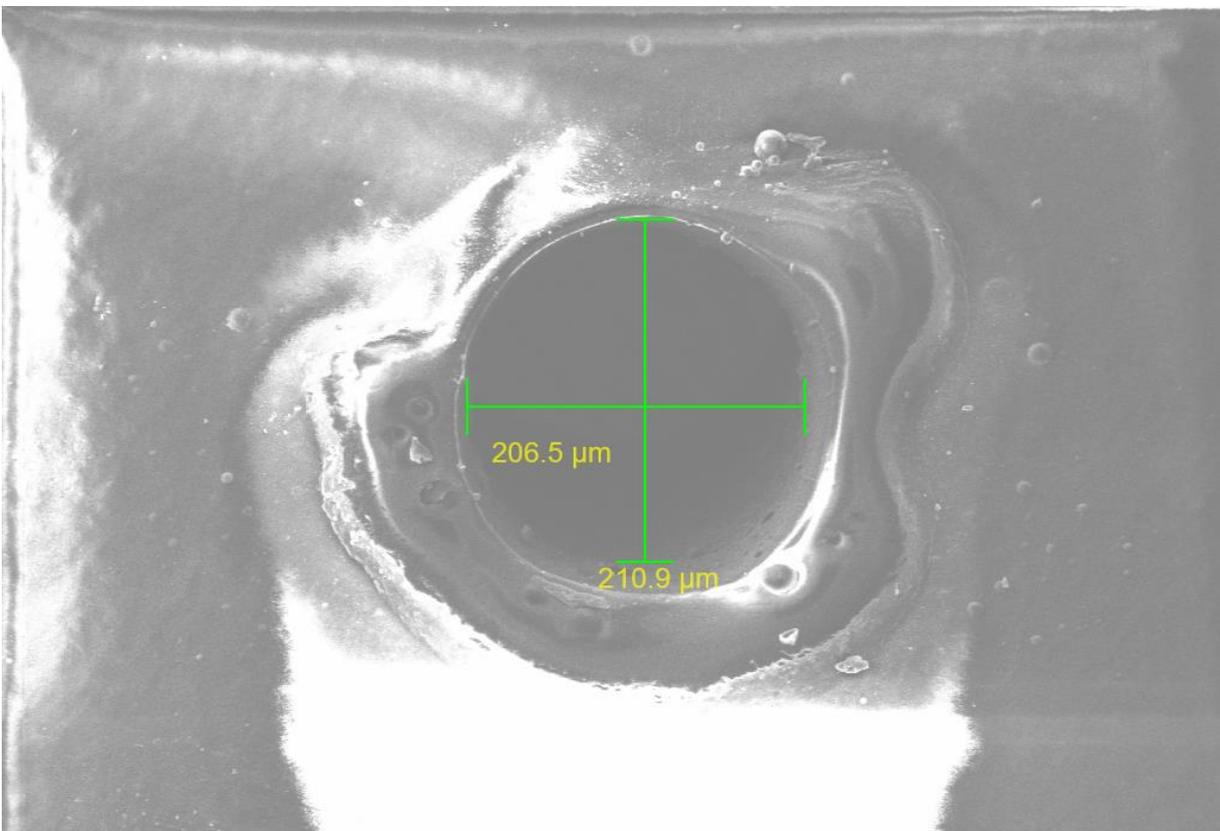


Abbildung 5: REM-Bild ohne vergoldeter Oberfläche – 100 μm Lochgröße (nominell), Fokuspunkt X, Innenseite.

4.3.1.2 Material und Methodik

Zur Bestimmung der Blasengröße erfolgten Untersuchungen zur Blasenbildung der verschiedenen Lochgrößen im Labor. Die Analysen umfassten drei verschiedene Konfigurationen wobei unterschiedliche Volumenströme pro Loch untersucht wurden. Ziel dieser grundlegenden Untersuchungen ist der Einfluss der Fertigungsmechanismen und des Materials auf die Blasenbildung und –größe. Nachfolgend wurden verschiedene Begaseranordnungen in praktischen Tests validiert. In Tabelle 2 sind nachfolgend die Konfigurationen aufgeführt, welche für die Blasenbildungsuntersuchungen herangezogen wurden. Es wurden zwei Ausführungen in Polyamid (PA) und eine Ausführung in Silikon getestet. Zur Auswertung wurden dann noch interne Daten sowie Daten aus der Literatur herangezogen. Die beiden PA-Röhrchen unterscheiden sich im Lochabstand und im Fokuspunkt des Lasers auf dem Scheitel. Einmal wurde links vom Scheitelpunkt (PA1) und einmal rechts vom Scheitelpunkt gelasert (PA2).

Bei den PA Rohren haben die Bohrungen einen Abstand von 1 mm vom Rohrscheitel mit einer Wandstärke von 0,5 mm. Bei den Silikonschläuchen beträgt der Abstand der Bohrungen vom Scheitel 0,5 mm bei einer Wandstärke 1,0 mm. Der Lochabstand hat dann unterschiedliche Lochanzahlen zur Folge. Zur Vergleichbarkeit wurde der Durchfluss pro Loch entsprechend der Lochanzahl auf den nominellen Gesamtvolumenstrom angepasst. Untersucht wurde der Bereich des Gesamtvolumenstroms von 0,5 bis 2,5 sl/min. Der Durchmesser (nominell) lag bei 10 µm bei den PA-Konfigurationen und 7 µm bei der Silikonausführung. Aus den vorhergehenden Bildanalysen war jedoch ersichtlich, dass der tatsächliche Durchmesser am Blasenaustritt weit aus über dem eingestellten Durchmesser lag. Zudem variiert die Fertigungstoleranz der Lochgröße insgesamt.

Tabelle 2: Messmatrix der Untersuchungen zur Blasenbildung für verschiedene Lochgrößen mit Fokuspunkten.

Eigenschaft	PA1	PA2	S1
Material	Polyamid	Polyamid	Silikon
Schlauchlänge	50 cm	50 cm	50 cm
Wandstärke	0.5 mm	0.5 mm	1 mm
Lochgröße, (nominell)	10 µm	10 µm	7 µm
Lochabstand	3.3 mm	2.0 mm	3.3 mm
Lochanzahl	115	193	119
Volumenstrom, nominell	0.5 - 2.5 sl/min		
Durchflussrate pro Loch	4 – 21 sml/(min*Loch)]	2 – 12 sml/(min*Loch)]	4 – 24 sml/(min*Loch)]

Abbildung 6 zeigt eine schematische Darstellung des in unserer Studie verwendeten Versuchsaufbaus. Eine Acrylglassäule mit rechteckigem Querschnitt (400×400 mm) und 300 mm Höhe wurde mit deionisiertem Wasser mit einer elektrischen Leitfähigkeit von $34,1 \mu\text{S}/\text{cm}$ gefüllt. Um vergleichbare Versuchsdaten zu erhalten, wurde darauf geachtet, das Wasser nicht zu verunreinigen, und es wurde vor jeder Messung erneuert. Der hydrostatische Flüssigkeitsspiegel wurde konstant bei 200 mm gehalten. Unter der Annahme, dass die Luft im Inneren der Blase dem idealen Gasgesetz entspricht, geben wir die Werte der Blasengröße unter normalisierten Bedingungen an, indem wir den hydrostatischen Druck durch Anwendung des Bernoulli-Prinzips ausschließen. Die angegebenen Werte entsprechen den Normbedingungen von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und $101,325 \text{ kPa}$. Über ein eingespanntes Linearbegaserröhrchen mit gelaserten Öffnungen unterschiedlicher Konfiguration wurden Luftblasen erzeugt. Der volumetrische Luftdurchsatz wurde mit Massendurchflussreglern von Omega Engineering Inc. mit vier verschiedenen Bereichen, nämlich 0,5, 10, 50 und $1000 \text{ ml}/\text{min}$, mit einer Unsicherheit von 0,8 % des Messwerts plus 0,2 % des Skalenendwerts geregelt. Eine Hochgeschwindigkeitskamera von Vision Research, Inc., Modell VEO 710L, wurde zusammen mit einem Mikroskopobjektiv, Modell K2 DistaMax™, von Infinity Photo-Optical Company verwendet. Das optische System hat eine räumliche Auflösung von $2 \mu\text{m}/\text{Pixel}$ und eine zeitliche Auflösung von $25 \mu\text{s}$. Die Belichtungszeit wurde auf $8 \mu\text{s}$ eingestellt. Die Hintergrundbeleuchtung erfolgte mittels einer gepulsten 200-W-LED-Lichtquelle von Veritas light, Modell Constellation 120E. Das endgültige Blasenvolumen wurde mit einem von Ziegenhein [18] entwickelten Bildverarbeitungsalgorithmus bestimmt. Eine ausführliche Erläuterung der einzelnen Schritte ist in Mohseni et al. [17] zu finden. Schließlich wurde der mittlere Sauter-Durchmesser d_{32} , auch bekannt als Oberflächen-Volumen-Mittelwert, als repräsentativer Mittelwert des Blasendurchmessers bestimmt.

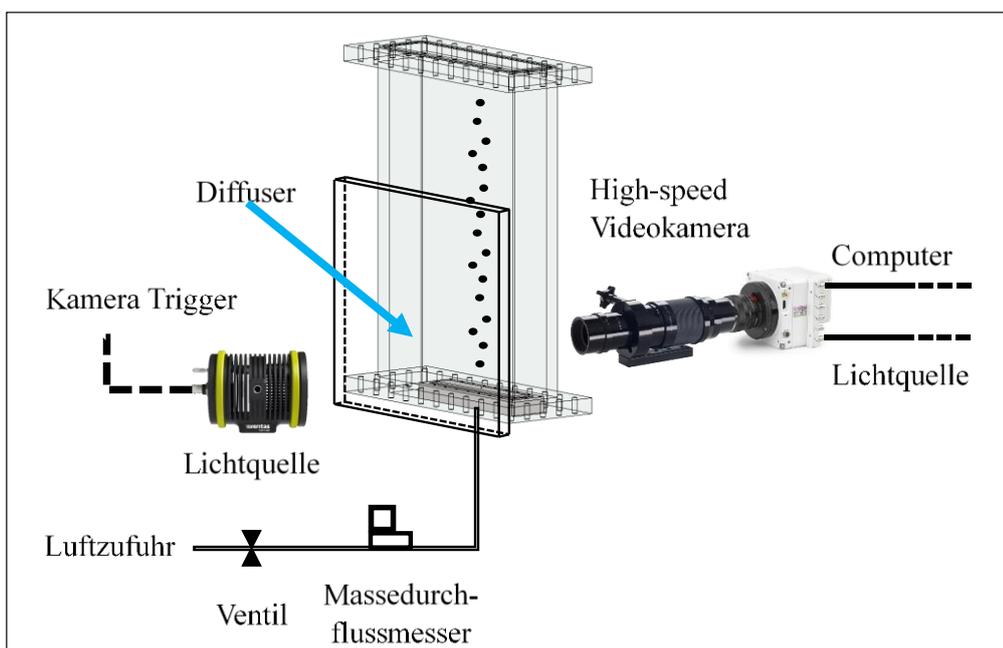


Abbildung 6: Schema zum experimentellen Aufbau der Blasengrößenuntersuchungen.

4.3.1.3 Ergebnisse Blasengrößenuntersuchungen

Bevor die Blasengrößen vermessen wurden, mussten die Röhren für den Betrieb eingefahren werden. Die Röhren liefen daher ca. 24 h im Wasser, damit sich die Blasenbildung stabilisieren konnte. Die berechneten Blasengrößen wurden zwei Untersuchungen aus der Literatur gegenübergestellt. Zum einen Hasanen et al. [13] und zum anderen Behnisch et al. [19]. Beide Studien unterscheiden sich in der Herangehensweise der Analysen, untersuchten aber in beiden Fällen Blasen bei kommerziellen Belüftern. In diesem Falle wurden der Sauterdurchmesser ($D_{32} = \text{Volumen (3) / Oberfläche (2)}$, flächengewichtetes Mittel; pro Lochdurchflussrate (q)) und der zahlengewichtete mittlere Durchmesser ($D_{10} = \text{Länge (1) / Anzahl (0)}$, zahlengewichtetes Mittel;) als repräsentative Parameter gewählt. Die in diesem Projekt erzielten Ergebnisse sind in Abbildung 7 zusammen mit den Blasengrößen aus der Literatur dargestellt.

Die von den Belüfterröhren PA1, PA2 und S1 produzierten Blasen wiesen in den ausgeführten Experimenten einen Sauter-Durchmesser von < 2 mm auf. Damit sind die Blasengrößen auch kleiner als bei Hasanen et al. und bei dem Tellerbelüfter (D2) in Behnisch et al.. Zudem wurden die Blasengrößen des Linearbegasers (alt) unterschritten. Lediglich der Tellerbelüfter (D1) aus Behnisch et al. erzielte kleinere Blasen als die untersuchten MILA-Konfigurationen. Es ist hier jedoch noch anzumerken das in Behnisch et al. aufgrund der Methodik (Vermeidung von Blasenbildüberlappungen bei der Auswertung) Blasengrößen am Rand der Belüftermembran bestimmt wurden. Daher wurden keine Koaleszenzeffekte berücksichtigt, welche vermehrt im Zentrum der Membran auftreten. Die Koaleszenzeffekte im Zentrum der Membran führen meist zu größeren Blasendurchmessern durch das Zusammenstoßen und Zusammenwachsen der Blasen in der Blasenbahn.

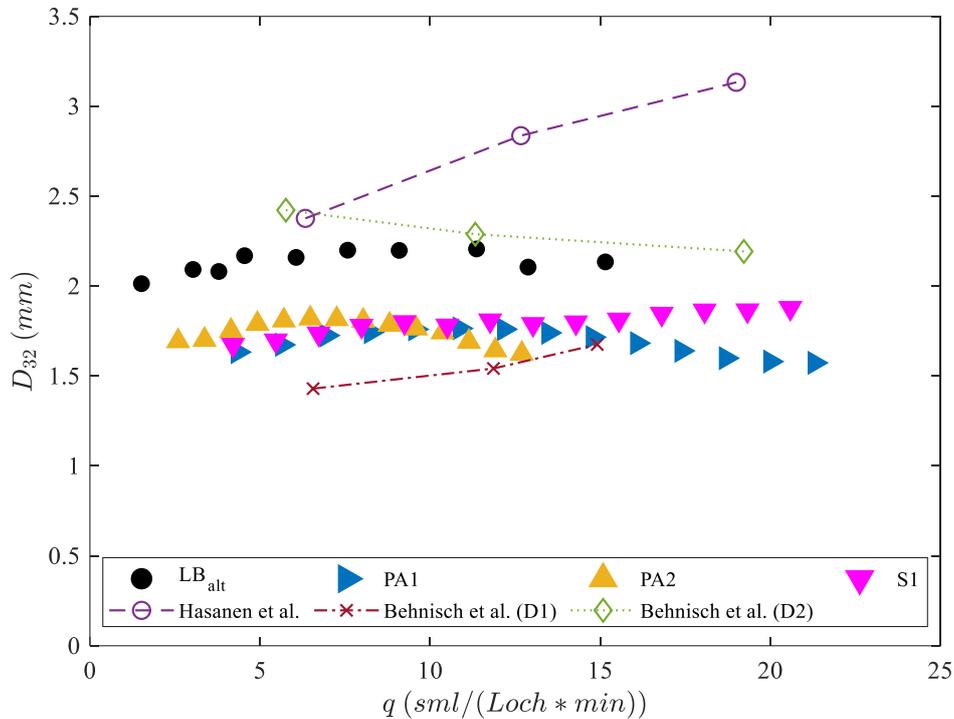


Abbildung 7: Messergebnisse der Blasengrößenanalysen der verschiedenen Konfigurationen PA1, PA2 und S1 zusammen mit Messwerten aus der Literatur (Hasanen et al., Behnisch et al.) und Messungen einer älteren Lineabegaserkonfiguration aus einem Projektvorgänger (LB_{alt}) als Vergleichswerte.

Während der Blasengrößenuntersuchungen ist jedoch aufgefallen, dass der Lochöffnungsgrad des jeweiligen Röhrchens stark vom eingetragenen Volumenstrom abhängt. In Kapitel 4.1.1.1 wurden die Lochgrößen untersucht und festgestellt dass die Lochgrößen aufgrund der Fertigungstoleranzen beim Lasern variieren. Damit ist auch der Öffnungsdruck zur Blasenbildung für jedes Loch unterschiedlich. Das führt dann zu einer ungleichen Verteilung des Druckes am Loch und damit zu einer inhomogenen Verteilung der Blasenbildung an den einzelnen Löchern. Um dies etwas genauer zu betrachten, wurden für zwei verschiedene Volumenströme (0,5 sl/min und 2,0 sl/min) Histogramme zur Blasengrößenverteilung und deren Summenverteilungskurve erstellt (siehe Abbildung 8 und Abbildung 9). Die Histogramme zeigen exemplarisch die Blasenauftretshäufigkeiten für PA1 in Abbildung 8 und S1 in Abbildung 9. In Abbildung 8 ist zu erkennen, dass für das PA-Röhrchen 1 bei einem niedrigeren Volumenstrom (linkes Bild, Durchfluss 0.5 sl/min) eine geringe Breite an Blasengrößen auftrat. Die Blasengrößen lagen hier im Bereich von 1.4 mm bis 1.6 mm. Beim Volumenstrom 2.0 sl/min konnten hingegen Größen von 1 – 1.6 mm beobachtet werden. Dies führte dann in der Auswertung letztlich auch zu einem geringeren d_{32} bzw. einem geringeren d_{10} . Dies würde die Beobachtung unterstützen dass mit einem generell höheren Volumenstrom (hier 2 sl/min) und einem damit höheren Eingangsdruck mehr Löcher geöffnet waren. Physikalisch wird bei einem geringeren Bohrdurchmesser ein höherer Eingangsdruck zum Ausgasen benötigt. Größere Bohrdurchmesser ermöglichen dann ein einfacheres Abgasen der Luft als kleinere Löcher. Dies führt zu einer inhomogenen Verteilung der Druckluft an die Löcher. Wird ein kritischer

Anfangsdruck zur Blasenbildung überschritten, findet auch ein Abgasen an kleineren Löchern statt. Daher wurden auch kleinere Blasen bei höheren Volumenströmen erzeugt.

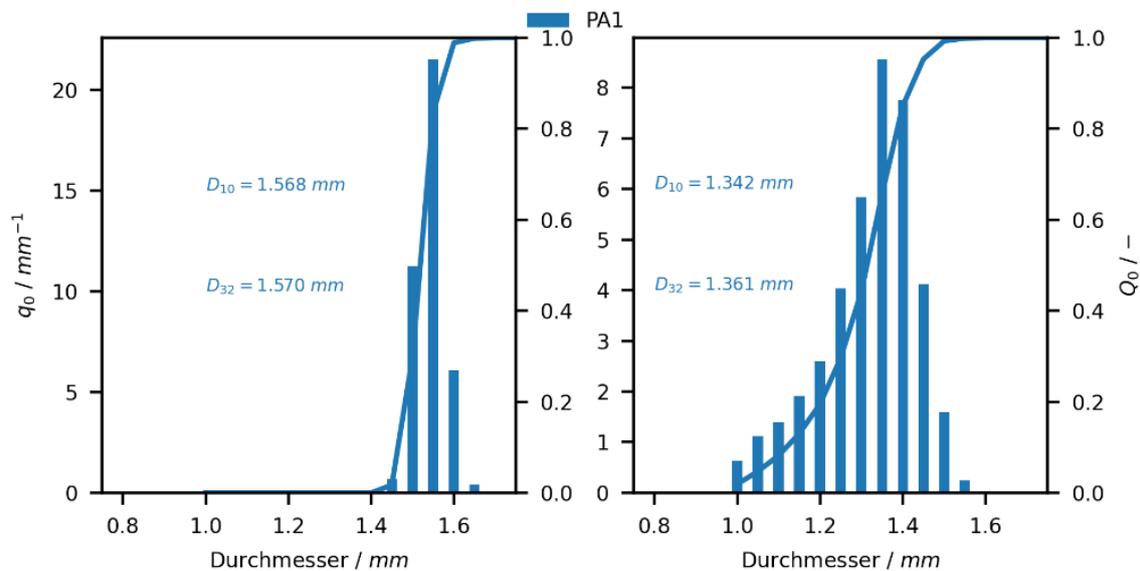


Abbildung 8: Histogramm mit Blasengrößenerteilung für PA1 für 0,5 sl/min (links) und 2,0 sl/min (rechts); Die linke y-Achse zeigt die Anzahl der Blasen pro Klassenbreite q_0 ; Die rechte y-Achse zeigt die Summenverteilungskurve (Q_0) der entsprechenden Blasengrößendurchmesser.

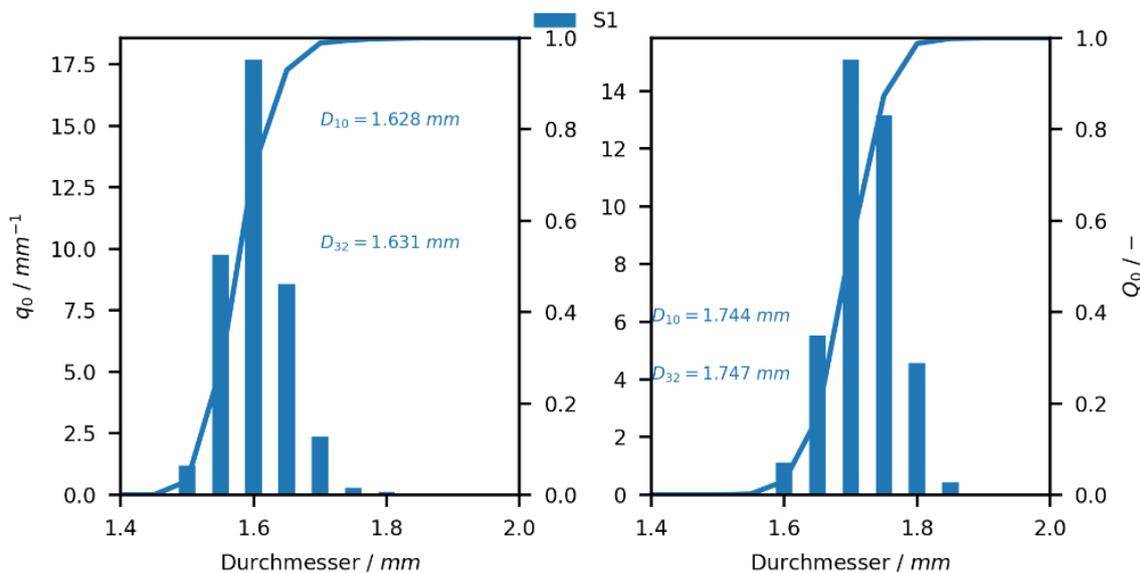


Abbildung 9: Histogramm mit Blasengrößenerteilung für S1 für 0,5 sl/min (links) und 2,0 sl/min (rechts); Die linke y-Achse zeigt die Anzahl der Blasen pro Klassenbreite (q_0); Die rechte y-Achse zeigt die Summenverteilungskurve (Q_0) der entsprechenden Blasengrößendurchmesser.

Da Silikon ein flexibles Material ist, verhalten sich die Löcher anders als bei dem starren Material (PA1/PA2). Für S1 konnte eine stabilere Blasengrößenverteilung bei ansteigendem Volumenstrom beobachtet werden. Für diese Ausführung konnten aufgrund des Materials keine Lochanalysen stattfinden, da sich der Bohrkanal aufgrund der Materialflexibilität nur bei Durchströmung öffnet. Insgesamt war eine gleichmäßigere Öffnung der Bohrungen entlang des Röhrchens zu beobachten, was auf die Flexibilität des Materials und die daraus resultierende gleichmäßigere Druckverteilung

zurückzuführen ist. Insgesamt scheint Silikon bezüglich der Lochöffnungsgrade damit unempfindlicher gegenüber den Fertigungstoleranzen zu sein ohne das signifikante Einflüsse auf die Blasengröße zu beobachten waren.

4.3.2 Technikumsversuche CLEWATEC (CWT)

4.3.2.1 Material und Methodik

Die Versuchsanlage besteht aus zwei instrumentierten Blasensäulen, die eine maximale Eintauchtiefe von 4 m und einen Innendurchmesser von 900 mm haben (siehe Abbildung 10). Die Säulen können mit deionisiertem Wasser ($\sigma < 10 \mu\text{S}/\text{cm}$), Leitungswasser, Salzwasser (z.B. $\sigma \approx 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$) oder Belebtschlamm aus einer lokalen Kläranlage befüllt werden. Damit sind Sauerstofftransferexperimente zur Bestimmung von k_{LA} oder bspw. Batch-Versuche mit Belebtschlamm zur Nitrifikation möglich. Der Gasfluss wurde mit Massendurchflussreglern (bis zu 500 sl/min, Standardbedingungen: 1,01325 bar bei 20 °C) von Omega Engineering Inc. geregelt. Als Belüftungsgas wurde Luft verwendet. Die Säulen sind mit Sensoren für gelösten Sauerstoff ausgestattet, die sich in der gewünschten Eintauchtiefen befinden. Ein Relativdrucksensor misst den Druckabfall an den Diffusoren. Die Belüftungseffizienz der gewünschten Belüfter kann daher direkt mit anderen im Handel erhältlichen Belüftersystemen verglichen werden. Für einen solchen Vergleich wurden die MILA-Belüfter unter den gleichen Versuchsbedingungen in den Säulen getestet. Der Bereich des Luftvolumenstroms wurde für die Versuche in sauberem Wasser zwischen 10 sl/min und 100 sl/min gehalten. Aufgrund der in vorhergehenden Tests identifizierten Effizienz beim Stoffeintrag in Reinwasser [20] wurde zudem eine ältere Konfiguration der mikroperforierten Röhren für den Vergleich herangezogen.

Die Versuche wurden für dieses Projekt wurden mit Reinwasser ausgeführt. Die Eintauchtiefe der Belüfter betrug ≈ 4 m. Neben der Sauerstoffkonzentration wurde während der Versuche auch die Wassertemperatur und die elektrische Leitfähigkeit überwacht. Eine schematische Übersicht der DN900-Versuchsanlage gibt Abbildung 10.

Die mikroperforierten MILA-Konfigurationen hatten einen *nominellen* Öffnungsdurchmesser von 100 μm , Fokuspunkt A (100A, vgl. Kapitel 4.3.1.1). Alle Rohre wurden aus Polyamid hergestellt. Diese Belüfterkonfiguration bietet im Vergleich zu anderen Belüftern eine homogenere Querschnittsverteilung der Gasphase zugunsten einer begrenzten Blasenkoaleszenz bei gleichzeitiger Beibehaltung einer hohen Lochdichte [20].

Für jeden der untersuchten Belüfertypen wurde die „aktive“ Belüftungsfläche bzw. Abgasungsfläche bestimmt. Diese wurde entweder berechnet oder konnte, für die kommerziellen Belüfertypen, den

Herstellerangaben entnommen werden. Die gesamte Manteloberfläche eines Schlauchbelüfters ($A_M = 2\pi * \text{Radius Begaserröhrchen} * \text{Länge Begaserröhrchen} * \text{Anzahl}$) wurde zur Berechnung der der aktive Belüftungsfläche für die mikroperforierten Rohre genutzt. Basierend auf Gleichung (1) wurde dann die Belegungsdichte berechnet [21]. Diese ergibt sich aus der gesamten aktiven Belüftungsfläche geteilt durch die Grundfläche der DN900 Säule ($A_{G, DN900} = 0,64 \text{ m}^2$).

$$BD = \frac{n_{\text{Belüfter}} * A_{\text{Belüfter}}}{A_{G, DN900}} \quad (1)$$

In Behnisch et al. konnte gezeigt werden, dass sich eine erhöhte Belegungsdichte auch in einem verbesserten Sauerstofftransfer widerspiegelt [22]. Daher wurde die Belegungsdichte für diese Versuche als kritischer Auslegungsparameter betrachtet. Es wurde daher für alle Belüfertypen, bis auf den Typ „MILA – Umlenkung“, eine annähernd gleiche Belegungsdichte für die DN900 Säulen gewählt. Im Projekt MILA wurden drei verschiedene Ausführungen der mikroperforierten Röhren untersucht:

- a) Lineares Modul basierend auf den Ergebnissen in [20]
- b) Modul „Umlenkung“ mit leicht höherer Begaserröhrlänge
- c) Modul Kombination – Kombination aus Linearer Ausführung und Umlenkung

Die untersuchten Ausführungen im Projekt MILA sowie die zum Vergleich herangezogenen kommerziellen Belüfter sind in Tabelle 3 dargestellt. Die entsprechenden Modulausführungen mit den unterschiedlichen Konturen „Kombi“ und „Umlenkung“ können der Abbildung 11 entnommen werden. Bei dem Modul „Linear“ wurden die Röhren parallel angeordnet (vgl. [20]). Die Röhren werden nach der Fertigung in eine vorgefertigte Nutenplatte verlegt. Die Nutenplatte wurde dafür mit den entsprechenden Konturen ausgefräst. Für die Versuche in der Versuchsanlage wurden die Module dann auf einem Rahmen installiert und in die entsprechende Tiefe getaucht. Ein exemplarischer Aufbau kann Abbildung 12 entnommen werden.

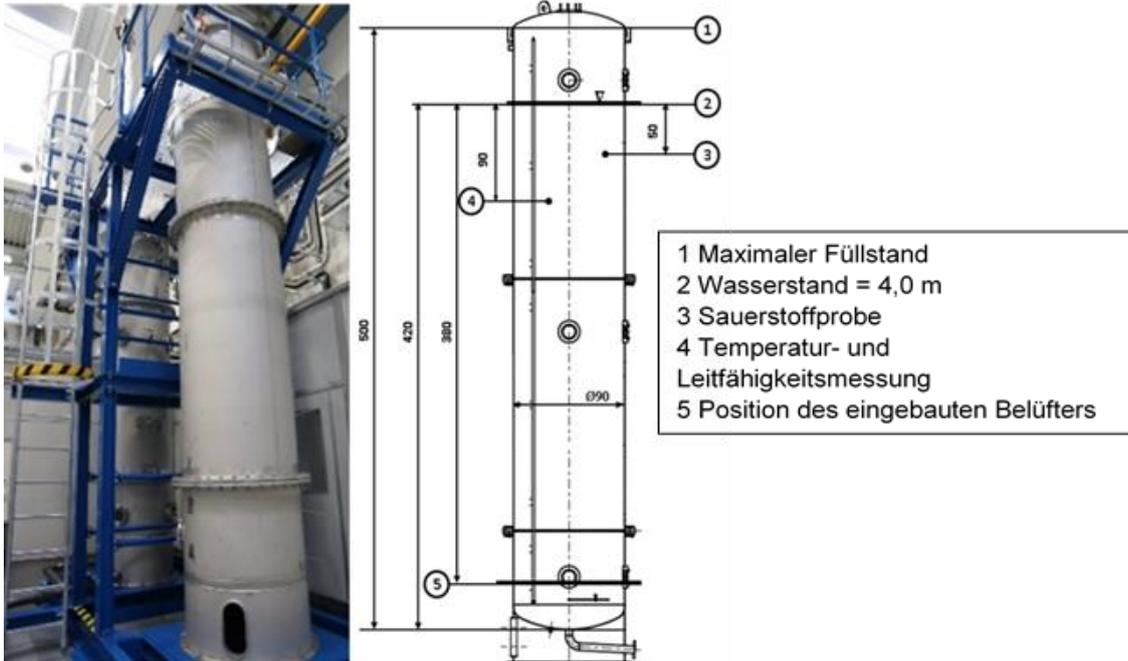


Abbildung 10: Schematischer Aufbau der DN900 Versuchsanlage.

Tabelle 3: Eigenschaften und untersuchte Parameter der getesteten Belüfter in den DN900 Säulen.

Eigenschaft	MILA - Linear	MILA - Kombi	MILA - Umlenkung	Schlauch	Teller	Linearbegaser - alt [20]
Lochdurchmesser, nominell	100 μm	100 μm	100 μm	1250 μm	1500 μm	100 μm
Anzahl installierter Belüfter(-röhrchen)	12	6	8	3	2	12
Länge eines Belüfters	0,50 m	0,996 m	1,07 m	0,33 m	-	0,50 m
Länge Belüfter, insgesamt	6,00 m	5,98 m	8,54 m	0,99 m	-	6,00 m
Außendurchmesser eines Belüfters/Röhrchens	0,006 m	0,006 m	0,006 m	0,035 m	0,28 m	0,006 m
Oberfläche Diffuser (pro Diffuser)	0,019 m^2	0,019 m^2	0,019 m^2	0,036 m^2	0,055 m^2	0,019 m^2
Oberfläche Diffuser (Gesamt, pro Säule)	0,113 m^2	0,113 m^2	0,161 m^2	0,109 m^2	0,110 m^2	0,113 m^2
Grundfläche DN900-Säule	0,64 m^2					
DN900 Säule - Belegungsdichte	17.66%	17.66%	25.16%	17.03%	17.19%	17.66%
Wassertiefe (Reinwasser)	4,0 m					
Messbereich Massedurchfluss	10 - 100 sl/min					
Untersuchte Parameter	k_{La} , SOTR, SSOTE, SAE					

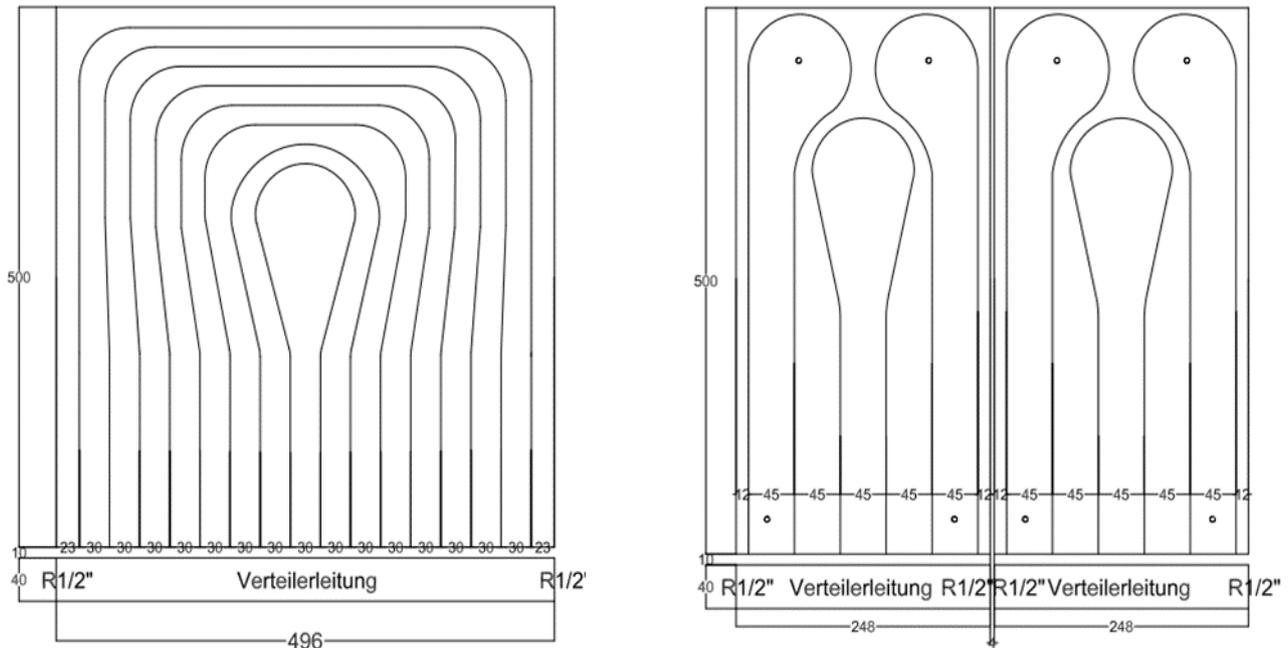


Abbildung 11: Skizzen der Röhrenanordnungen bei den Modulausführungen „Umlenkung“ (links) und „Kombi“ für die DN900 Säulen



Abbildung 12: Installation des Moduls „MILA – Umlenkung“ (links) und der Tellerbelüfter (rechts) in den DN900 Säulen

Die Konfigurationen wurden auf folgende Parameter zur Charakterisierung der Eintragungseffizienz untersucht (vgl. Tabelle 3):

- Belüftungskoeffizient **k_{La}** ,
- Standard **Oxygen Transfer Rate** (SOTR; kgO_2/h),
- Specific Standard **Oxygen Transfer Efficiency** (SSOTE; $\%/m$),
- Standard **Aeration Efficiency** (SAE; kgO_2/kWh).

Die nachfolgenden Berechnungen basieren auf dem Regelwerk der DWA und sind dem Merkblatt DWA M-209 entnommen [23]. Der Luftvolumenstrom der genutzten Belüfter wird über Massstromregler eingestellt. Der Verlauf der Gelöstsauerstoffkonzentration wird über die getauchte Sauerstoffsonde bis zum Erreichen des Sättigungswertes aufgezeichnet. Aus dem Verlauf der gemessenen Gelöstsauerstoffkonzentration C_t werden der volumetrische Stoffübergangskoeffizient

(Belüftungskoeffizient) k_{LaT} sowie der Sauerstoffsättigungswert $C_{S,p^*,T}$ mittels einer Regression und dem nichtlinearen Modell nach Gleichung (2) bestimmt. Mit den unter Standardbedingungen ($T = 20\text{ °C}$ und $p = 1013\text{ hPa}$) geltenden Werten für die Sättigung $C_{S,20}$ nach Gleichung (3) und den Stoffübergangskoeffizienten k_{La20} nach Gleichung (3) wird die Sauerstoffzufuhr SOTR nach Gleichung (5) bestimmt. Dafür werden die temperaturspezifischen Standard-Sauerstoffsättigungswerte $C_{S,St,T}$ nach DIN EN ISO 5814:2013-02 [24] genutzt. Die Standard-Sauerstoffzufuhr SSOTR wird nach Gl. (6) aus dem SOTR mit dem Standard-Luftvolumenstrom $Q_{A,S}$ und der Einblastiefe h_D bestimmt. Weiterhin wurden aus den Gleichungen (7) – (8) die Kenngrößen zur Sauerstofftransfereffizienz (SSOTE) und zum Belüftungseffizienz (SAE) berechnet.

$$C_t = C_{S,p^*,T} - (C_{S,p^*,T} - C_0) \cdot e^{-k_{LaT} \cdot t} \quad [\text{mg/L}], \quad (2)$$

$$C_{S,20} = C_{S,p^*,T} \cdot \frac{C_{S,St,20}}{C_{S,St,T}} \cdot \frac{1013}{p^*} \quad [\text{mg/l}]. \quad (3)$$

$$k_{La20} = k_{LaT} \cdot 1.024^{(20-T)} \quad [\text{h}^{-1}], \quad (4)$$

$$SOTR_{20} = \frac{V \cdot k_{La20} \cdot C_{S,20}}{1000} \quad [\text{kgO}_2/\text{h}] \quad (5)$$

$$SSOTE_{20} = \frac{100 \cdot SOTR_{20}}{h_D \cdot (0.299 \cdot Q_{A,N})} \quad [\%/m] \quad (6)$$

$$SAE_{20} = \frac{SOTR_{20}}{P} \quad [\text{kgO}_2/\text{kWh}] \quad (7)$$

Ein beispielhafter Verlauf eines solchen Absorptionsversuches kann der Abbildung 13 entnommen werden. Zuerst wird über die Belüfter reiner Stickstoff in das Medium eingetragen um die Sauerstoffkonzentration durch Strippung abzusenken. Nach Erreichen einer variabel gesetzten Minimumkonzentration an Sauerstoff (während der Versuche $C_{s,0} = 0,75\text{ mg/l}$) wird das einströmende Gas umgestellt auf Luft. Infolgedessen steigt die Sauerstoffkonzentration wieder an und der Versuch wird bis zum Erreichen der experimentellen Sättigungskonzentration fortgeführt. Anschließend erfolgte zur Bestimmung des k_{La} die Auswertung der erhaltenen Kurve mittels nicht-linearer Regression. Aufgrund einer breiten Auswahl an Durchflussraten wurden die Versuche für jeden Massedurchfluss nur einmal ausgeführt, wurden jedoch wiederholt falls ein Messwert unplausibel erschien.

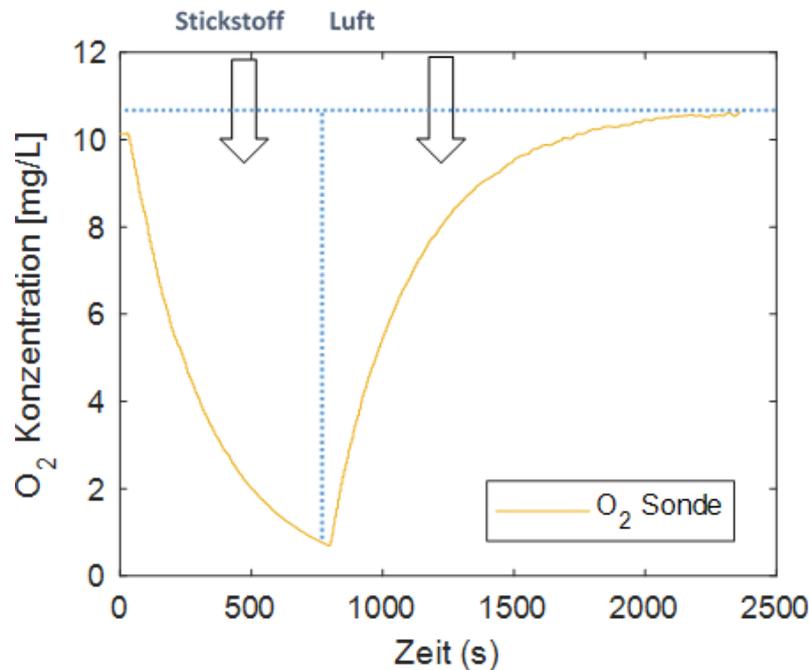


Abbildung 13: Exemplarischer Verlauf der Gelöstsauerstoffkonzentration während eines Absorptionsversuches in den DN900 Säulen zur Bestimmung des k_{La} .

4.3.2.2 Ergebnisse DN900-Säulen

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse aus den Absorptionsversuchen in den DN900 Säulen des CLEWATEC dargestellt und diskutiert. Zunächst wird der generelle Stofftransport in Form des k_{La20} gegenübergestellt und bewertet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 14 dargestellt. Die im Projekt MILA neu untersuchten Konfigurationen sind „Umlenkung“, „Kombi“ und „MILA“. Die Bezeichnung „MILA“ beschreibt hierbei die lineare Belegungsvariante der Konturen (siehe 4.1.2.) ähnlich dem Aufbau in Hermann-Heber et al. in [20]. Eine ausführlichere Diskussion der Ergebnisse ist in Kapitel 4.1.3 zu finden. In diesem Abschnitt soll zunächst kurz auf die wichtigsten Erkenntnisse eingegangen werden.

Wichtigste Erkenntnisse des k_{La20} :

- Effizienterer Stoffübergang bei Modulen „MILA“ und „Kombi“ ggü. Teller- und Schlauchbelüfter ab ca. 30 sl/min.
- Modul „Umlenkung“ erst ab 70 sl/min Vorteile ggü. kommerziellen Belüftern, trotz höherer Belegungsichte.
- Alter Linearbegaser aus SEBAK-Projekt erzielte den effizientesten Stoffübergang aller Belüfter im Test.

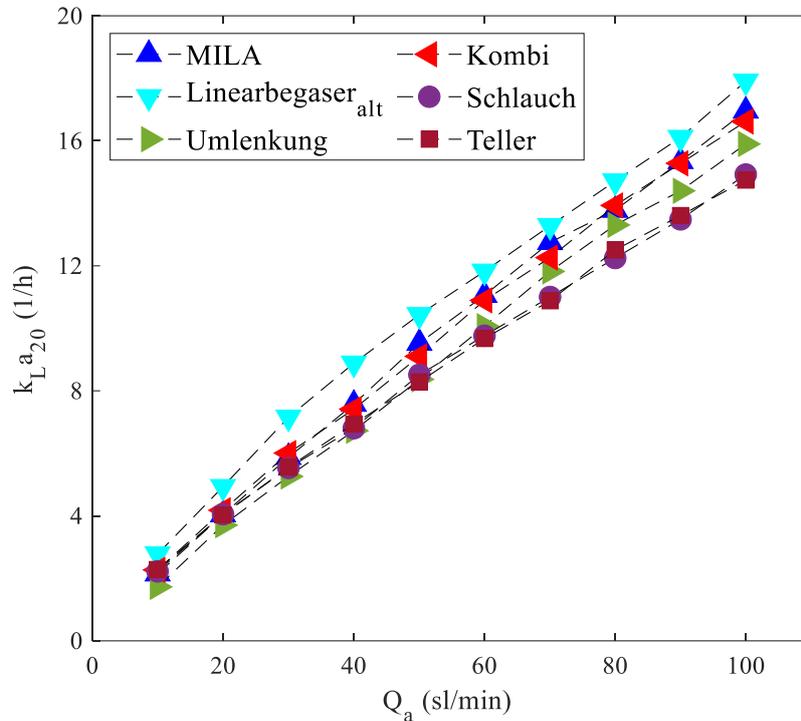


Abbildung 14: Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse der DN900 Säulen aus den Absorptionsversuchen für den k_{La20} der verschiedenen Belüfterkonfigurationen.

Für den $SOTR_{20}$ wurde nach Behnisch et al. eine Normierung auf das belüftete Behältervolumen der DN900 Säulen vorgenommen [22]. Hierzu wurden sowohl $SOTR$ als auch der Volumenstrom Q durch das Volumen der DN900 Säulen (bei ca. 4 m Füllhöhe ergeben sich in etwa 2,80 m³ Wasser) geteilt. Dadurch können die hier erzielten Ergebnisse mit der linearen Trendlinie, erhalten aus den Resultaten von Behnisch et al., verglichen werden. Dementsprechend können die hier erzielten Ergebnisse bezüglich ihrer Sauerstofftransfertrate und auf Übereinstimmung in Bezug auf Linearität überprüft werden. Die sich daraus ergebenden normierten Sauerstofftransferraten ($SOTR_{20, ATV}$) in Abhängigkeit vom normierten Massevolumenstrom (Q_{ATV}) können Abbildung 15 entnommen werden.

Wichtigste Erkenntnisse des $SOTR_{20, ATV}$:

- Alle untersuchten Belüftertypen zeigen einen linearen Trend gleich der Referenz Behnisch et al. [22].
- Module „MILA“ und „Kombi“ zeigen auch beim $SOTR_{20, ATV}$ ab 30 sl/min eine erhöhte Transfertrate.
- „MILA“ ab 40 sl/min im Gegensatz zum k_{La20} hier verbesserte Sauerstofftransfertrate auch ggü. Modul „Kombi“.
- „Umlenkung“ im unteren Massedurchflussstrom < 40 sl/min geringsten Stofftransport, ab 60 sl/min erhöht ggü. Teller- und Schlauchbelüfter aber niedriger als „MILA“ oder „Kombi“.

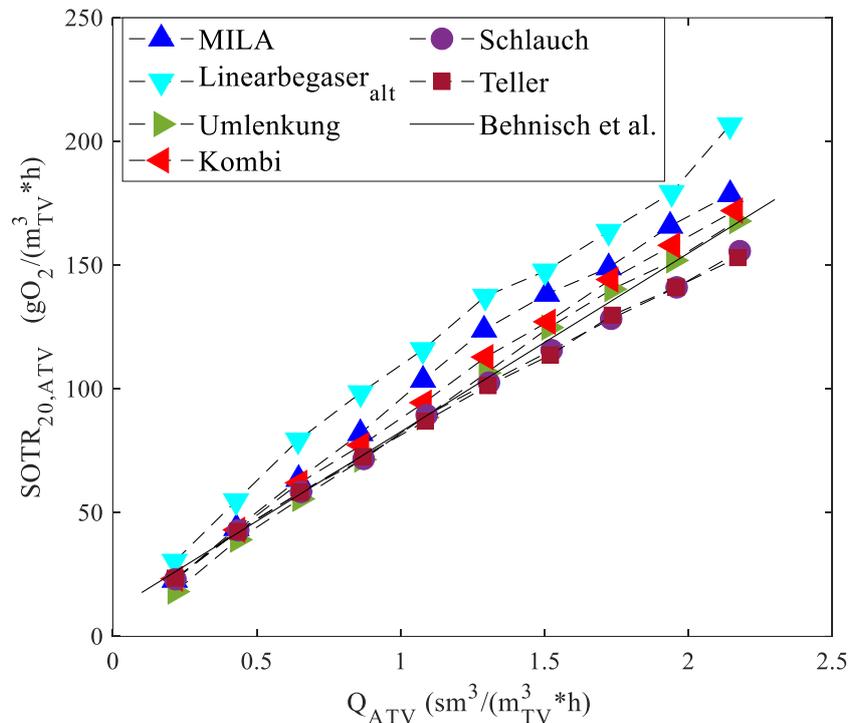


Abbildung 15: Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse der DN900 Säulen aus den Absorptionsversuchen für den SOTR_{20,ATV} der verschiedenen Belüfterkonfigurationen sowie die Trendlinie (schwarze Linie) aus den Versuchen von Behnisch et al. [22].

Die Versuchsergebnisse für die Sauerstofftransfereffizienz sind in Abbildung 16 dargestellt. Auch hier konnten Vergleichswerte aus der Literatur zum Beurteilen der Transfereffizienz herangezogen werden. Behnisch et al. empfehlen für einen effizienten Stofftransfer Werte des SSOTE bei einer Belegungsichte von 15 – 35 % im Bereich von 8,5 %/m – 9,8 %/m [22]. Dieser Bereich wurde ebenfalls in der Abbildung als grauer Hintergrund dargestellt, zusätzlich zu den Versuchsergebnissen.

Wichtigste Erkenntnisse des SSOTE₂₀:

- Nur Belüfbertyp „Linearbegaser“ erreichte für diese Versuchsreihe den vorgeschlagenen SSOTE-Bereich von 8,5 %/m – 9,8 %/m.
- Für die Module „Kombi“, „MILA“ konnten neben „Linearbegaser“ die effizientesten Transferleistungen pro m Wassertiefe erzielt werden.
- Für das Modul „Umlenkung“ konnten bis 50 sl/min keine Verbesserungen in der Transfereffizienz beobachtet werden. Ab 60 sl/min erhöhte Effizienz ggü. Schlauch und Tellerbelüfter.

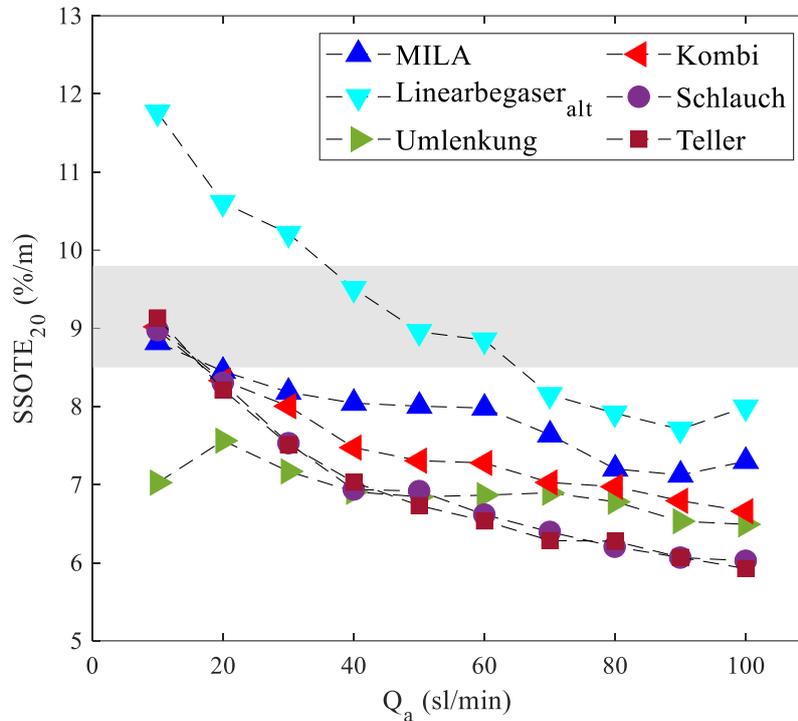


Abbildung 16: Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse der DN900 Säulen aus den Absorptionsversuchen für den SSOTE₂₀ der verschiedenen Belüfterkonfigurationen und der von Behnisch et al. vorgeschlagenen Effizienzspanne von 8,5 %/m – 9,8 %/m [22].

In den SAE fließt zur Bestimmung der Energieeffizienz nach Gleichung (7) der Druckverlust p eines Belüftersystems mit ein. Der Verlauf der Druckverluste in Abhängigkeit vom Volumenstrom kann Abbildung 17 entnommen werden. Wie in Hermann-Heber et al. schon untersucht, war die alte Linearbegaserkonfiguration das System mit dem höchsten Druckverlust [20]. Dies lag zum einen an den kleinen Öffnungen, zum anderen kann dies aber auch auf eine Wandstärke von ≈ 1 mm zurückgeführt werden. Wird diese, wie bei den neuen MILA-Konfigurationen, von 1 mm um die Hälfte auf 0,5 mm reduziert, so fällt auch der Druckverlust deutlich ab. Für die ältere Linearbegaserkonfiguration wurde bei 100 sl/min ein Druckverlust von knapp 700 mbar erreicht. Bei allen neuen MILA-Konfigurationen wurden auch bei dem höchsten Luftvolumenstrom nicht mehr als 100 mbar überschritten. Dies stellt eine deutliche Reduzierung verglichen mit der alten Ausführung dar. Dementsprechend zeigt sich auch eine Verbesserung des SAE. Die erzielten SAE-Werte für die DN900-Versuche sind in Abbildung 18 veranschaulicht.

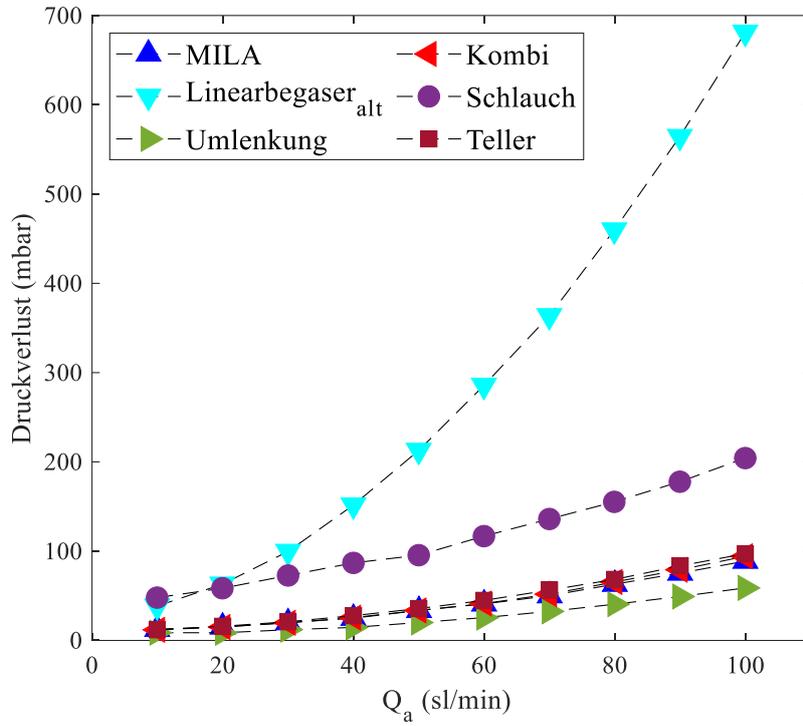


Abbildung 17: Gegenüberstellung der gemessenen Druckverluste während der Absorptionsversuche für die verschiedenen Belüfterkonfigurationen.

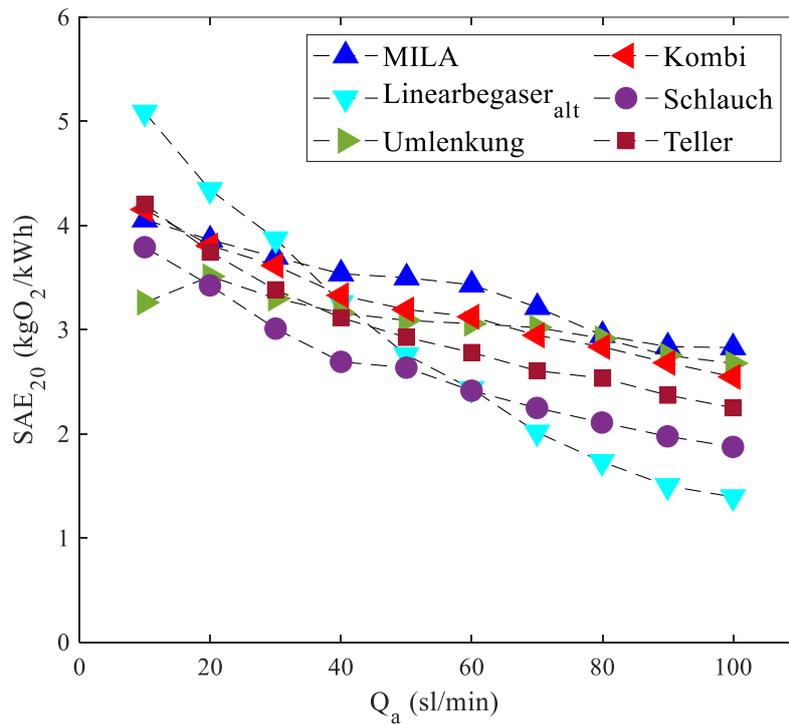


Abbildung 18: Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse der DN900 Säulen Absorptionsversuche für den SAE_{20} der verschiedenen Belüfterkonfigurationen.

Wichtigste Erkenntnisse des SAE_{20} :

- Reduzierter Druckverlust der Module „MILA“, „Kombi“ und „Umlenkung“ ggü. „Linearbegaser“ wirkt sich deutlich positiv auf den SAE aus.
- Während für „Linearbegaser“ ab 40 sl/min der SAE gleich oder niedrigerer als der SAE der anderen Belüfertypen war, erzielten die Module „Kombi“ und „MILA“ aufgrund des reduzierteren Druckverlustes und einer erhöhten Stofftransferleistung einen ggü. den kommerziellen Belüftern gleichwertigen bzw. verbesserten SAE.
- Für das Modul „Umlenkung“ konnte ein verbesserter SAE vgl. mit Teller- und Schlauchbelüfter erst ab einer Durchflussrate von 60 sl/min beobachtet werden.

Insgesamt konnte mit den in diesem Projekt ausgeführten Reinwasserversuchen gezeigt werden, dass der Sauerstoffeintrag der Konfigurationen „MILA“, „Kombi“, und ab ca. 50 sl/min auch beim Modul „Umlenkung“, mindestens die Sauerstoffeinträge eines kommerziellen Belüftersystems erreicht oder sogar übertroffen werden. Eine detailliertere Gegenüberstellung aller verschiedener Belüfertypen soll hervorheben welche Modulkonfiguration für die Belebtschlammversuche genutzt werden soll. Hierzu wurde die nachfolgende Formel (8) verwendet, welche zur Berechnung der relativen Messabweichung eines erzielten Messwertes (MW1) bezogen auf den „wahren“ Messwert (MW2) [25] dient:

$$\text{Rel. Abweichung} = \frac{MW_1 - MW_2}{MW_1} * 100\% \quad (8)$$

Zu Berechnung der rel. Abweichung wurde zunächst ein Belüfertyp als „wahrer“ Messwert ausgewählt. Der „wahre“ Messwert stellt in diesem Bericht nur eine idealisierte Bezeichnung für den Bezugswert eines in Relation zu setzenden Messwertes dar. Unter Berücksichtigung der oben dargestellten Ergebnisse wurde für diesen Bericht die relative Abweichung eines Belüfters (MW2) auf den zugehörigen Messwert der Konfiguration „MILA“ (MW1) des jeweiligen Parameters (Y) bezogen. Daraus lassen sich dann mit Formel (9) die relativen Unterschiede der Modulkonfiguration „MILA“ zu allen anderen Belüfterkonfigurationen berechnen und darstellen.

$$\text{Rel. Abweichung (Y)} = \frac{MW_{1,MILA} - MW_{1,Belüfter X}}{MW_{1,MILA}} * 100\% \quad (9)$$

Ausgehend von diesen Berechnungen wurden die Ergebnisse in Abbildung 19 veranschaulicht. Dabei stellt der grüne Hintergrund („Positiv“) Verbesserungen des Moduls „MILA“ verglichen mit dem jeweiligen Belüfertyp und dessen Messwert dar. Hingegen zeigt der rote Hintergrund („Negativ“) eine Unterschreitung des „MILA“-Messwertes gegenüber dem zugehörigen Bezugswert des zu vergleichenden Belüfters. Die Berechnung der relativen Abweichung umfasste die Parameter k_{La20} , $SOTR_{ATV,20}$, $SSOTE_{20}$ und SAE_{20} . In Abbildung 19 wird deutlich, dass die lineare Ausführung „MILA“ verglichen mit allen Belüftern, außer der älteren Ausführung „Linearbegaser“, die höchste

Leistungsfähigkeit aufweist. Für den überwiegenden Teil der Messwerte vom Modul „MILA“ konnten hier in den Versuchen Verbesserungen erzielt werden. Lediglich für den Massenfluss von 10 sl/min waren keine Steigerungen beim Modul „MILA“ zu erkennen. In Bezug auf die Ausführung Linearbegaser wurde festgestellt, dass diese Konfiguration, wie in den Versuchen zu erkennen war, für die Parameter k_{La20} , $SOTR_{ATV,20}$ und $SSOTE_{20}$ die besten Ergebnisse erzielte. Aber auch hier wird nochmal deutlich, dass der Druckverlust und dessen Verminderung bei den neueren Linearbegaserausführungen „MILA“, „Kombi“ und „Umlenkung“ ab 40 sl/min eine deutliche Senkung des erforderlichen Energiebedarfs zur Folge hat. Für alle weiteren Versuche wurde daher entschieden, die lineare Ausführung des Linearbegasers „MILA“ für die Untersuchungen im Belebtschlamm zu betrachten.

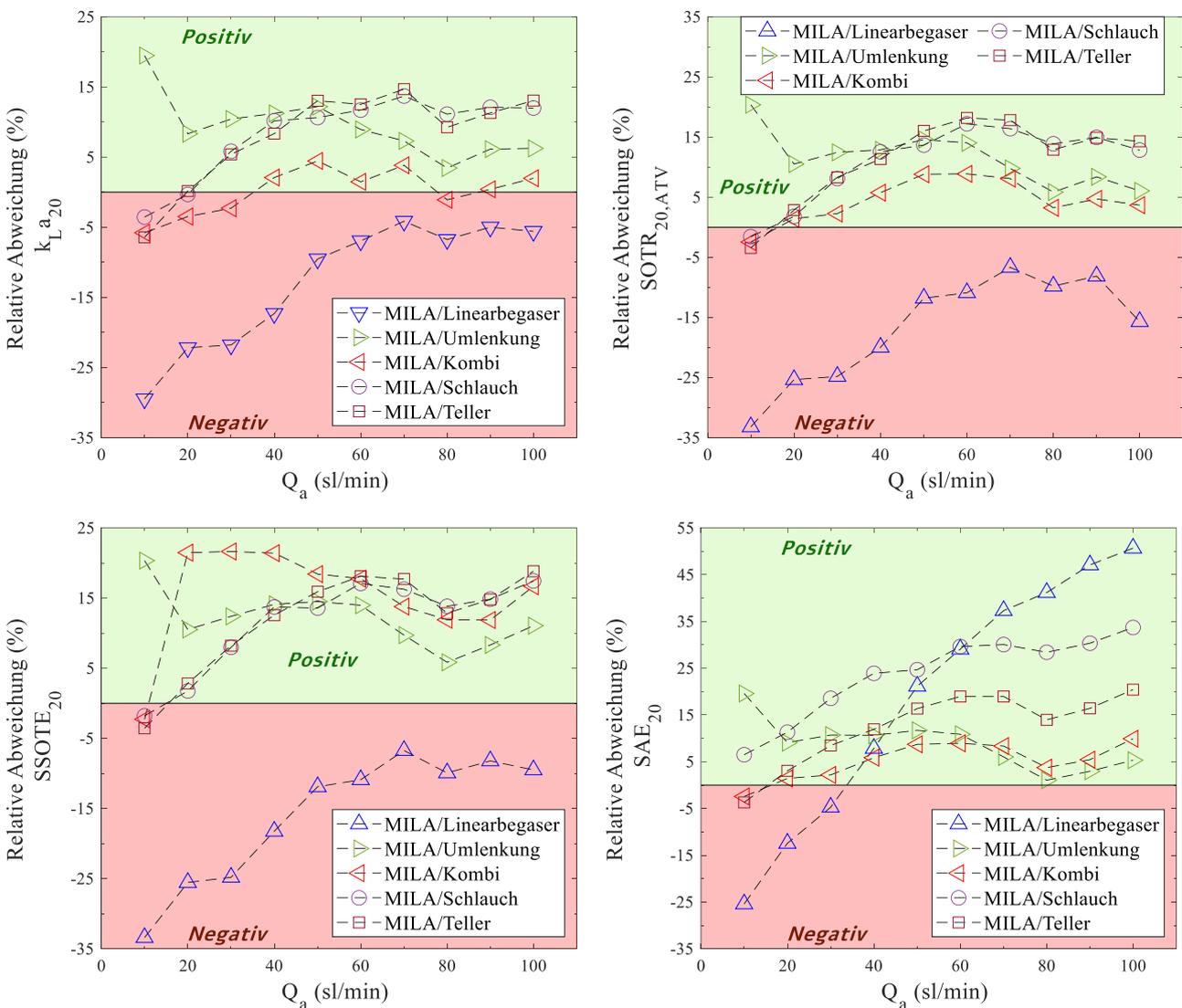


Abbildung 19: Gegenüberstellung der berechneten relativen Abweichungen der Parameter k_{La20} , $SOTR_{20,ATV}$, $SSOTE_{20}$ und SAE_{20} (von links oben nach rechts unten) für die lineare Konfiguration „MILA“ zu dem jeweils aufgeführten Belüftersystem; Grün: positive Verbesserung gegenüber dem als Vergleich gewählten Belüfter; Rot: Verschlechterung gegenüber dem als Vergleich gewählten Belüfter.

4.4 Projektbereich II – Aquakultur (IWEB)

Der Aquakulturbetrieb Forellenhof Wilkendorf hat im Frühjahr 2022 den Betrieb vorläufig eingestellt. Eine Weiterführung ist vorgesehen. Es besteht weiterhin Kontakt von IWEB zum Forellenhof Wilkendorf.

Bei dem Forellenhof Mohnen wurden im Frühjahr 2023, im Herbst 2023 und im Frühjahr 2024 Eintragstest mit PA Rohren durchgeführt, die für den Forellenhof Mohnen nicht zufriedenstellend verliefen. Beim Forellenhof Mohnen werden Keramikbelüfter mit feinstblasigem Eintrag für Sauerstoff eingesetzt. Die mit dem PA Rohr erreichten Blasendurchmesser waren nicht so effektiv wie die derzeit eingesetzten Keramikbelüfter.

Hier kann derzeit über punktuelle Tests von je rd. zwei Stunden berichtet werden.

Ergebnis zum Kontakt zum Forellenhof Mohnen

Nach den häufiger auftretenden Phasen mit Wassertemperaturen von über 25°C über mehrere Wochen haben lt. Mohnen zahlreiche Aquakulturen auf den Eintrag von Sauerstoff (O₂) umgestellt bzw. ergänzen bei hohen Lufttemperaturen mit O₂. Bei Mohnen werden hierzu die Keramiksteine nicht mehr in den 1 m³ Zuchtbecken, sondern auch in den offenen Freilandbecken eingesetzt. Damit stehen nicht mehr Druckverluste, sondern die erreichbare Sauerstoffkonzentration im Wasser bei Aquakulturen im Vordergrund. Als Konsequenz ist zumindest für den Forellenhof Mohnen eine Blasengröße wie sie mit den Keramiksteinen erreicht werden anzubieten. Alternativ sind Begaserrohre, die weitläufig im Becken ausgelegt werden und Blasengrößen in „Sektglasqualität“ erzeugen, zu fertigen und einzusetzen.

Die von Mohnen geforderte Blasengröße konnte bisher nicht mit PA Rohren erreicht werden. Stand Juni 2025 konnte bisher nicht bei Mohnen der Einsatz von Silikonschläuchen und PTFE-Rohren getestet werden.

4.5 Projektbereich III – Abwasserbehandlung (IWEB, Air Liquide)

Es soll hier nochmals erwähnt werden, dass der Projektpartner Abwasserverband Horlofftal (Kläranlage Florstadt) nicht Teil des Projektes war. Der Verband trat Ende Oktober 2022 von seinen Projektaufgaben zurück. Dies geschah aufgrund von personellen Herausforderungen, Baumaßnahmen auf der Reinigungsanlage und verschiedenen anlagentechnischen bzw. verfahrenstechnischen Anpassungen mit Verweis auf die steigenden Herausforderungen in der Energie- und Fällmittelversorgung. Aus den genannten Gründen war eine Fokussierung und angemessene Mitarbeit des Projektpartners im Vorhaben leider nicht möglich. Ein entsprechender adäquater Ersatz konnte nicht gefunden werden. Daher wurden die Versuche in diesem Abschnitt umstrukturiert.

Zum einen fand ein Druckverlustmonitoring bei der Emschergenossenschaft statt, mit Begaserröhrchen gefertigt aus Polyamid (PA). Weiterhin wurden auf einer Industriekläranlage eines Schlachtbetriebs des Projektpartners Air Liquide Begaserröhrchen aus Silikon (Si) eingesetzt. Aufgrund der erhöhten chemischen Anforderung der Industriekläranlage soll die Einsatzmöglichkeit von Silikon für diese Anwendung geprüft werden. Die Versuche in Belebtschlamm zu Untersuchungen des Sauerstoffeintragsverhaltens und des Verhaltens des Druckverlustes gliederten sich dadurch in zwei unterschiedliche experimentelle Abschnitte:

- a) Versuche zum Verhalten des Druckverlustes unter Anwendung einer regelmäßigen automatisierten Druckspülung ohne Monitoring des Sauerstoffeintrags; im TECHNIKUM des Emschergenossenschaft-Lippeverbandes (EGLV) auf der Kläranlage „Emschermündung“ in Dinslaken,
- b) Versuche zum Sauerstoffeintrag und der Beständigkeit/Robustheit der Silikonröhrchen unter erhöhten Beständigkeitsanforderungen auf der Industriekläranlage. Eine automatisierte Druckspülung wurde hier nicht vorgesehen da mit einer Reinsauerstoffbegasung auf der Industriekläranlage gearbeitet wird und ein ausreichend großer Druck zum Freispülen vorhanden war.

Als Ausgangspunkt für das geplante Projekt ist festzuhalten, dass aus energetischer Sicht die Vorteile der höheren Sauerstoffausnutzung bei der Belüftung mit dem Linearbegaser das im Vergleich zu konventionellen Belüftern höhere Niveau des Druckverlustes überkompensieren sollen. Die Versuche bei der EGLV dienen einerseits als unabhängige Vergleichsmessung zu den Experimenten in den DN900 Säulen und andererseits zur Erprobung einer automatisierten Druckspülanlage. Diese Vorrichtung soll Ablagerungen und Verblockungen reduzieren und damit einen Anstieg des Druckverlustes minimieren. Diese Überlegung basiert im Grunde auf intern ausgeführten Voruntersuchungen die hier noch einmal kurz aufgeführt werden sollen.

4.5.1 Druckmonitoring auf dem TECHNIKUM der EGLV

4.5.1.1 Vorbetrachtung Druckspülung

Für die Voruntersuchungen wurde ein Testmodul mit Linearbegaserschläuchen (10 Stück, Konfiguration „Linearbegaser_{alt}“, vgl. Kapitel 4.1.2) auf der Kläranlage Ottendorf-Okrilla im Belebungsbecken betrieben und wöchentlich geprüft. Die Werte des Druckverlustes wurden konstant überwacht und zeigten einen erkennbaren Anstieg über die Einsatzdauer. Beispielhaft ist ein Abschnitt des Druckmonitorings in Abbildung 20 dargestellt. Als Ursachen konnten in späteren Untersuchungen per REM/EDX Mikroskopie Fouling- und Scalingeffekte identifiziert werden. Die Reinigung durch die Spülstöße mit einer Dauer je Spülstoß von ca. 60 Sekunden bei ca. 4 bar Druckverlust am Begaser führte unmittelbar zu einer Stabilisierung des Druckverlustes am Linearbegaser auf dem Niveau von ca. 130 mbar und zu einer weitestgehenden Wiederherstellung des Massendurchflusses durch die Druckverlustreduktion. Im Rahmen des Projekts wurde diese Strategie zur dauerhaften Verringerung des Druckverlustes detaillierter untersucht. Aus den Vorversuchen wurde zunächst abgeleitet, dass bei einer regelmäßigen Druckspülung eine dauerhafte Begrenzung des Druckverlustes möglich erscheint und damit die langfristige Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit verbessert werden kann. Insbesondere wird eine automatisierte Instrumentierung für tägliche oder stündliche Spülstöße und permanenten Impulsbetriebs im Sekundenbereich, welche Reinigung und verbesserte Sauerstofftransporteffizienz verbindet, angestrebt.

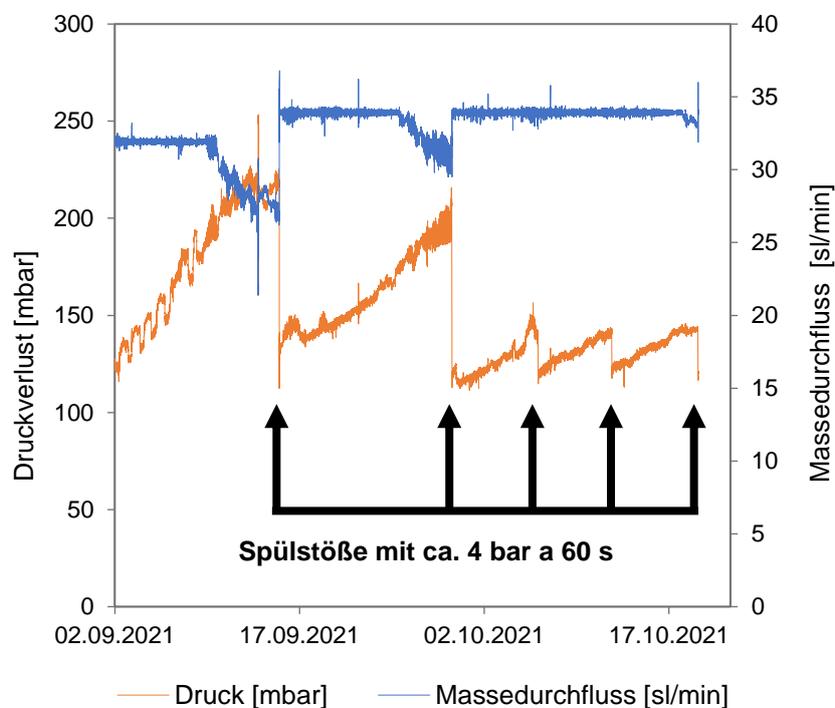


Abbildung 20: Beispielhafter Verlauf des Druckverlustes während der Vorversuche älterer Linearbegaserröhrchen auf der Kläranlage Ottendorf-Okrilla.

4.5.1.2 Material und Methodik

Zur Reduzierung von Verunreinigungen und Verblockungen an den Öffnungen des Begasers während des Betriebes in Abwasser wurde eine Drückspüleinrichtung entworfen. Diese basiert im Wesentlichen auf den Voruntersuchungen zum Verhalten des Druckverlustes am Linearbegasers während eines Langzeitmonitorings (siehe 4.5.1.1) beim Einsatz in Belebtschlamm. Es war ersichtlich, dass der Druckverlust innerhalb weniger Wochen anstieg, dieser mittels Druckstößen aber wieder entscheidend abgesenkt werden konnte. Daher wurde für den Betrieb eines Linearbegasermoduls eine automatisierte Spüleinrichtung entworfen und an die EGVL versandt und dort betrieben. Diese Einrichtung wurde dann im weiteren Projektverlauf genutzt um Aufschluss über die Effektivität eines solchen Spülmechanismus zu erlangen, vor allem im Hinblick auf verzögertes Zusetzen der Öffnungen und der damit einhergehenden effizienten Eintragsleistung des Begasers im realen Betrieb. In Abbildung 21 ist die Spülvorrichtung mit den eingebauten Komponenten dargestellt.

Die Einrichtung besitzt folgende Hauptkomponenten:

- Mehrkanal-Prozessanzeige – CIT 650 – Datenlogger (1)
- Druckmessumformer zur Relativdruckerfassung – BDSensors DMP457 (2)
- Masse- und Volumendurchflussregler zur Durchflusserfassung – OMEGA FMA-2609A (3)
- Elektronische Temperaturregelung im Schrank – STEGO ETF 012 (4)
- Schaltschrankheizgerät – Pfannenberg PFH/PFH-T (5)
- Temperaturerfassung des Versorgungsgases – TURCK TTM-203A (6, *verbaut hinter Nr. 7*)
- Druckregler der Überdruckbeaufschlagung – Druckregler Timmer WAI-R1-3/8-12-M (7)
- Absperrventil der Überdruckversorgung – Bürkert Typ 6027 Hubankerventil (8)
- Zeitsteuerung für Magnetventile – Bürkert Magnetventilaufsatz Typ 1078 (9)

Weiterhin sind folgende Anschlüsse für die Zu- und Ableitung zum Belüfterelement sowie ein elektrisches Anschlusskabel vorgesehen:

- Zuluftschlauchanschluss 10 mm zur Standarddruckluftversorgung (A)
- Zuluftschlauchanschluss 10 mm zur Überdruckdruckluftversorgung (B)
- Elektrisches Versorgungskabel (C)
- Ausgang Druckluftversorgung mit Schlauchanschluss 10 mm (D)

Nachfolgend soll kurz auf den Betrieb der Einrichtung eingegangen werden. Prinzipiell sind zwei Versorgungsleitungen für den Betrieb des Begasers vorgesehen (Luftleitungen A und B). Leitung A

dient zur Luftversorgung im regulären Betrieb und läuft über einen vorgeschalteten Druckminderer (7), einen Volumendurchflussregler (3), eine Gastemperaturmessung (6) und einen Drucksensor (2) zum Belüfterelement. Die Daten der verschiedenen Komponenten werden dabei für eine spätere Auswertung über einen Datenlogger (1) erfasst. Zur Überdruckbeaufschlagung des Belüfters öffnet das Ventil (8), zeitgesteuert über einen passenden Ventilaufsatz (9). Damit sollen Druckstöße von etwa 4 bar die Öffnungen der Röhren freiblasen. Die Überdruckroutine sieht dabei zwei Spülvorgänge am Tag mit ca. 4 bar Überdruck vor, also aller 12 h einen Spülvorgang. Auch hier wird der Druckverlust während und nach dem Spülvorgang dauerhaft aufgezeichnet. Beim Partner EGVL wurde dann eine ausgewählte Belüfterkonfiguration über diese Einrichtung mehrere Wochen betrieben. Über das Druckmonitoring lieferte Erkenntnisse über den Anstieg des Druckverlustes im realen Betrieb .

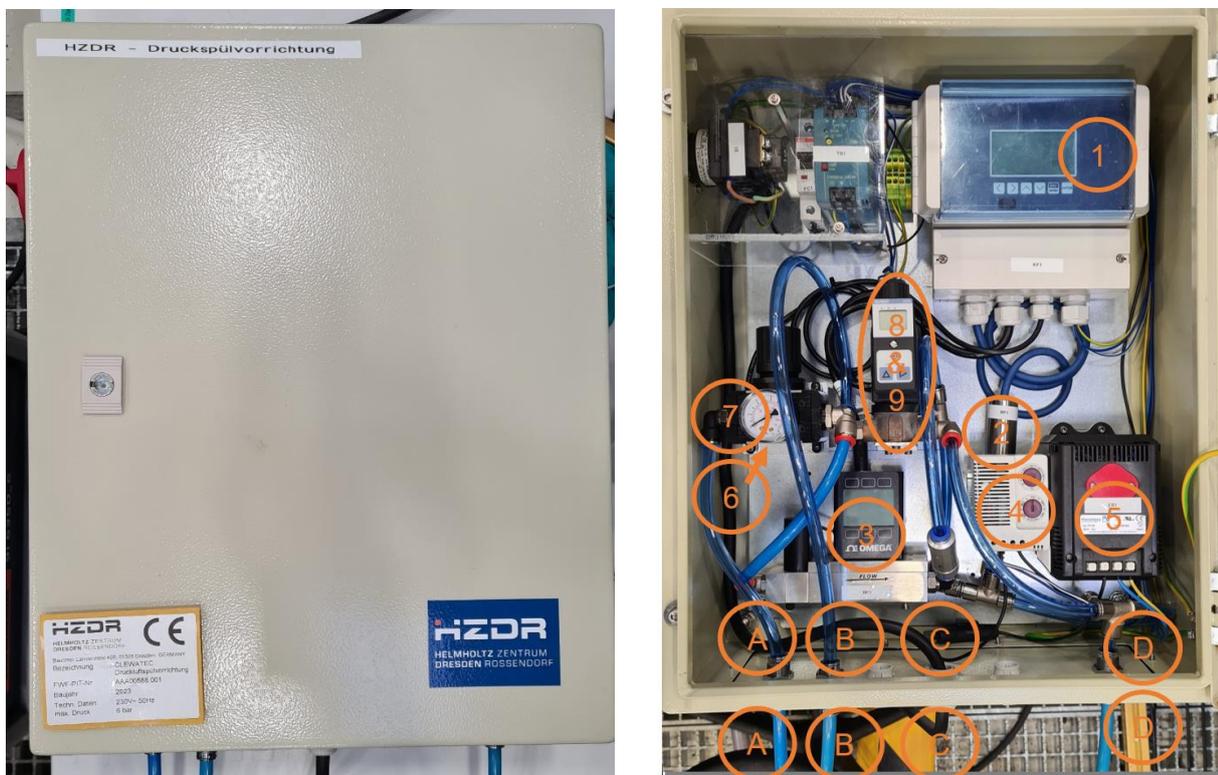


Abbildung 21: Außenansicht (links) und Innenansicht (rechts) der Druckspüleinrichtung mit installierten Komponenten.

Im Folgenden soll nur kurz auf die Versuchskläranlage der EGVL eingegangen werden. Da deren Betriebsführung für dieses Projekt nicht weiter relevant war, werden nur die wichtigsten Kenndaten und Verfahrensschritte dargestellt.

Das Technikum gliedert sich zunächst in eine 2-straßige Belebungsanlage inklusive vorgeschalteter Rechenanlage und Vorklärung. Die Belebungsanlage ist für ca. 1.000 EW ausgelegt. Anschließend wird das Abwasser in der Nachklärung vom Schlamm getrennt und einer nachgeschalteten Sandfiltration zur weitestgehenden Schwebstoffabtrennung zugeführt. Daneben existieren zur weiteren Purifikation des Abwassers Versuchsstände zur Mikroschadstoffentfernung, bspw. Umkehrosmose oder granuliert Aktivkohle. Die Begaserröhren wurden in der

Denitrifikationszone des Belebungsbeckens eingesetzt, da zur Zeit dieses Projekt anderweitige Versuche in der belüfteten Zone durchgeführt wurden. Dadurch sollte ein unbekannter Einfluss auf die Versuchsergebnisse vermieden werden. Da die Belüftermodule zudem mit einem relativ geringen Volumenstrom betrieben wurden, konnte ein negativer Einfluss auf die Deni-Zone ausgeschlossen werden. Ein Luftbild der Versuchsanlage kann Abbildung 22 entnommen werden. Darin ist auch der Einsatzort der Begaserröhrchen markiert. Der Druckspülkasten wurde an die Druckluftversorgung der Versuchshalle (direkt neben der Versuchskläranlage) des Technikums angeschlossen (siehe Abbildung 23). Die Kompressorleitung stellte einen maximalen Druck ca. 6 – 8 bar zur Verfügung. Während der Spülstöße konnte kein Massendurchfluss aufgezeichnet werden.



Abbildung 22: Luftbild der Versuchskläranlage der EGLV auf der Kläranlage „Emschermündung“ mit Einsatzort der Begaserröhrchen im Deni-Becken (orangener Kreis).

Eingesetzt wurde ein 1 m x 1 m Modul, welches je zur Hälfte aus der Kontur „Umlenkung“ und „MILA (linear)“ bestand. Die Kontur „Umlenkung“ bestand aus einer 1000 mm x 498 mm Kontur mit 18 m Rohrlänge. Die Kontur „MILA“ hatte 12 parallele Nuten mit 12 m Begaserrohrlänge, sowie eine Größe von 1000 mm x 498 mm. Der Volumenstrom wurde auf 19 sl/min eingestellt. Die eingesetzten Begaserröhrchen entsprachen hierbei der folgenden Konfiguration:

- Konturtyp: „Umlenkung“ und „MILA“
- Modulgrundfläche: 1000 mm x 2x498 mm
- Lasereinstellung: Lochgröße 20 µm bei 10 mm Lochabstand
- Schlauchlänge gesamt: 30 m
- Eintauchtiefe. ca. 3 m



Abbildung 23: Installierte Druckspüleinrichtung des HZDR an der Versuchskläranlage der EGLV auf der Kläranlage „Emschermündung“.

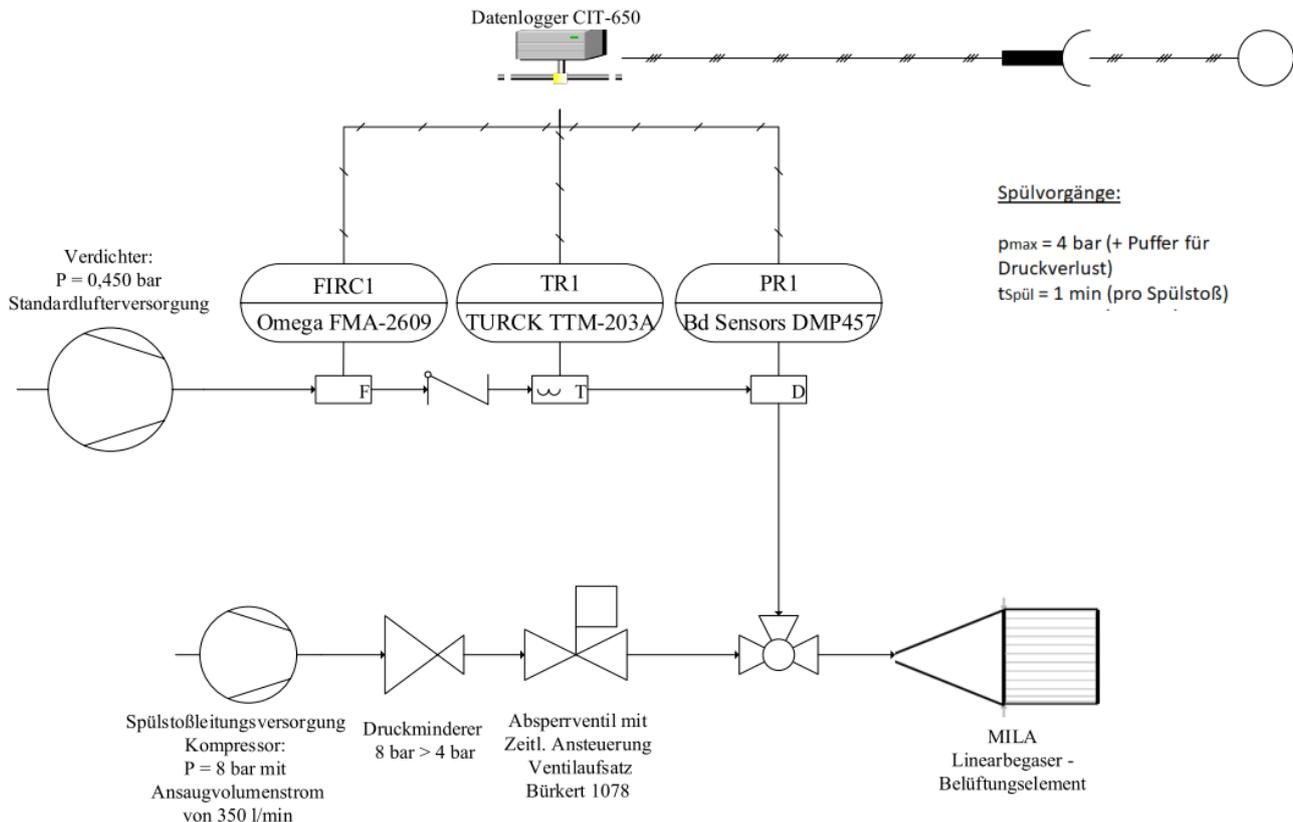


Abbildung 24: Fließschema der automatisierten Druckspüleinrichtung.

4.5.1.3 Ergebnisse Druckmonitoring auf dem Technikum der EGLV

Die Versuche zum Druckverlust fanden im Zeitraum April 2023 – Anfang Juli 2023 statt. Im Zeitraum vom 04.04.2023 – 26.05.2023 wurde die automatisierte Druckspülung zweimal täglich für 60 s angewendet. Danach wurde umgestellt auf einmal täglich für 60 s. Die Loggingzeit des Datenloggers während der Versuche war 60 s um ein detailliertes Bild zum Druck zu erhalten. Daneben wurden im Zeitraum vom 27.05.2023 – 01.06.2023 die Loggingzeit auf 1 s gesetzt um den Verlauf der Druckstöße zu analysieren und die dabei erreichten maximalen Drücke zu untersuchen. Danach wurde wieder alle 60 s geloggt.

Die Ergebnisse des Druckmonitorings auf dem Technikum der EGLV sind in den nachfolgenden Abbildungen veranschaulicht. Zunächst soll auf den generellen Verlauf des Druckverlustes eingegangen werden. Der aufgezeichnete Druckverlust, aber ohne Darstellung der jeweils erreichten Druckspitzen durch die automatisierte Spülung, ist zusammen mit dem Massendurchfluss in Abbildung 25 veranschaulicht. Es soll hier zunächst auf die Auffälligkeiten während des Druckmonitorings eingegangen werden:

- Innerhalb des ersten Tages wurde eine Reduktion im Druckverlust von ca. 20 mbar aufgezeichnet. Diese Reduktion erfolgte nach dem allerersten regulären Druckspülgang. Ein Grund könnten Fertigungsrückstände in den Bohrkanälen sein, welche nach der ersten Druckspülung entfernt wurden und so den Druckwiderstand im Bohrkanal verringerte. Andere Gründe wie Biofouling oder Scalingeffekte scheinen nach einem so kurzen Betriebszeitraum noch nicht einflussreich genug zu sein. Zudem konnte in den ersten 24 Stunden kein Anstieg des Drucks beobachtet werden.
- Am 21.06. – 22.06. kam es zu einem halbtägigen Ausfall in der Luftversorgung des Moduls, da der Kompressor einen Ausfall hatte. Vor dem Ausfall betrug der Druckverlust ca. 80 mbar. Kurz vor dem Ausfall der Luftversorgung stieg der Druckverlust, wenn auch nur kurzfristig, auf ca. 140 mbar an bevor der Ausfall stattfand. Der Druckverlust konnte hier aber mit der an diesem Tag ausgeführten Spülvorgang wieder auf ca. 90 mbar zurückgebracht werden. Danach kam es zum Ausfall der Luftversorgung.
- Nach der Wiederinbetriebnahme lag der Druckverlust bei ca. 110 mbar, was für Ablagerungen und eingedrungenes Wasser im Belüfter spricht, da so ein höherer Druckwiderstand während des Belüftens entsteht. Der erste Spülvorgang (23.06.) nach dem Ausfall sorgte dann wieder für eine Reduktion um ca. 65 mbar, auf ein Druckniveau von rund 40 mbar und damit einem vergleichbaren Druckverlust wie zu Beginn des Versuches im April. Der Druckverlust verblieb danach bei etwa 45 – 50 mbar.
- In den letzten Tagen des Monitorings, etwa beginnend am 06. Juli 2023, konnte wieder ein leichter Anstieg des Druckverlustes (> 55 mbar) beobachtet werden. An den letzten beiden Tagen des 09. Und 10. Juli konnte ein relativ schneller Anstieg des Drucks beobachtet werden. Die Gründe sind hier aber nicht bekannt. Es ist aber deutlich zu erkennen das nach der letzten Druckspülung am 10. Juli, kurz vor Beendigung des Versuches, der Druck wieder auf ca. 50 mbar zurückgesetzt wurde.
- Insgesamt konnte der Druckverlust aber stabil bei etwa 40 – 50 mbar gehalten werden. Hierbei handelt es sich um einen vergleichbaren Wert für den Druckverlust wie bei industriell gefertigten Belüftern. Falls sich die Stabilität des Druckverlustes auch in späteren Langzeitmonitorings bestätigen lässt, kann davon ausgegangen werden dass mit den erhöhten Stoffeintragungswerten (vgl. Experimente DN900 Kapitel 4.1) Effizienzsteigerungen beim Gaseintrag und damit Energieeinsparungen im Langzeitbetrieb möglich sind.

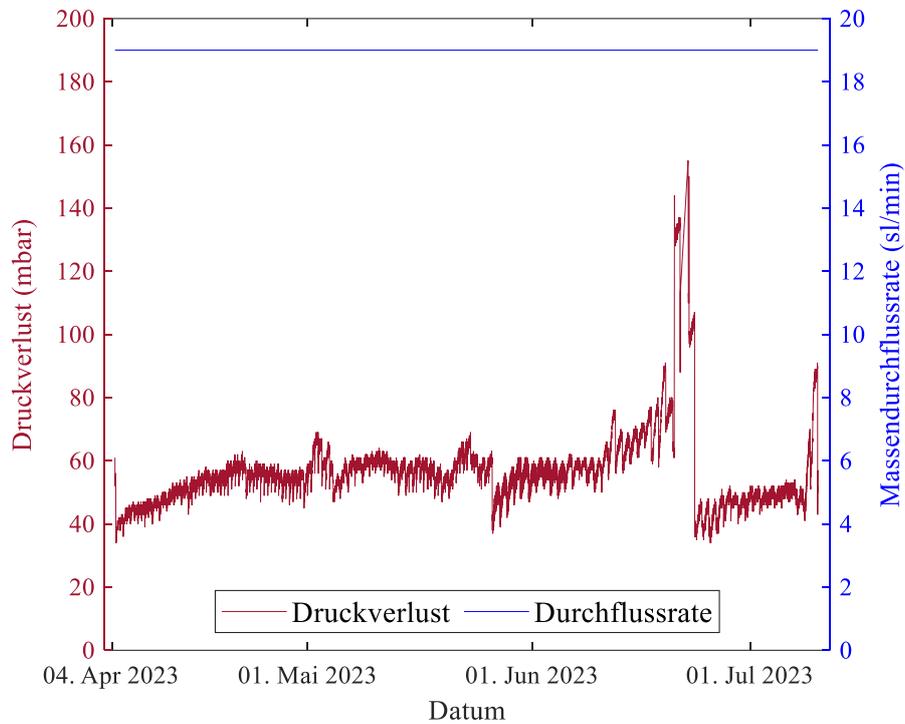


Abbildung 25: Druckverlust ohne Spülstöße (rot) und Massedurchfluss (blau) der MILA-Belüftermodule auf der Versuchsanlage Technikum der EGLV

Nachfolgend soll hier noch etwas detaillierter auf die angewendeten Spülstöße eingegangen werden. Zum einen sind alle vom Datenlogger erfassten und aufgezeichneten Druckspitzen in Abbildung 26 dargestellt. Hierzu ist zu sagen, dass die Druckstöße in einem Bereich 1500 mbar – 4300 mbar lagen. Die große Spannweite kann auf den gesetzten Loggingzeitraum von 60 s zurückgeführt werden, da Loggingzeit und Druckspülungstimer nicht synchronisiert waren. Es ist den Daten zu entnehmen, dass je nach Startzeitpunkt der Druckspülung vom Datenlogger immer ein fixer Datenpunkt aufgezeichnet wurde und daher der aufgezeichnete Druckwert stark variieren konnte. Hier sind bspw. der im Verlauf aufgezeichnete Minimalwert von ca. 1500 mbar oder der deutlich höhere Maximalwert von ca. 4300 mbar, welcher aus dem engeren Loggingzeitraum stammt, zu nennen. Generell ist festzuhalten, dass sich aus den aufgezeichneten Druckwerten der Druckstöße ein Mittelwert von etwa 3300 mbar errechnen ließ.

Aus dem Zeitraum 27.05 – 01.06.2023 sind die Druckstoßverläufe und deren erreichte bzw. errechnete Minimal-, Durschnitts-, und Maximalwerte in Abbildung 27 bzw. in Abbildung 28 veranschaulicht. Die in Abbildung 27 gezeigten Druckstöße weisen alle einen ähnlichen Verlauf auf mit einem ähnlich hohen Startwert auf. Am 28.05. wurde der geringste Startwert verzeichnet. evtl. wurde hier gerade von einem anderen Verbraucher in der Werkshalle der EGLV Druck aus der Ringleitung abgenommen. Insgesamt konnten aber bei den abgebildeten Druckstößen keine Auffälligkeiten beobachtet werden.

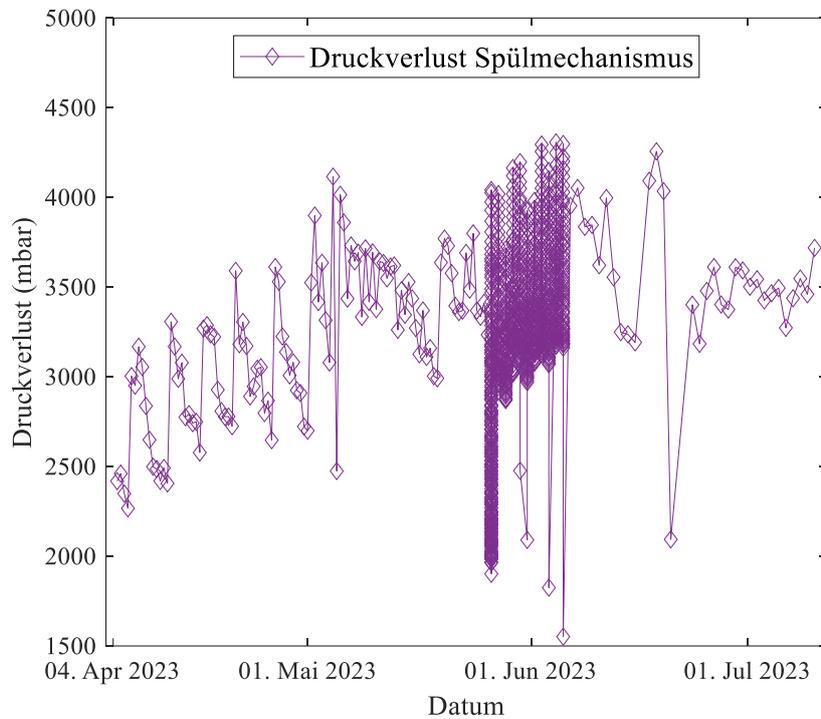


Abbildung 26: Druckverlust der Spülstöße der Belüftermodule auf der Versuchsanlage Technikum der EGLV

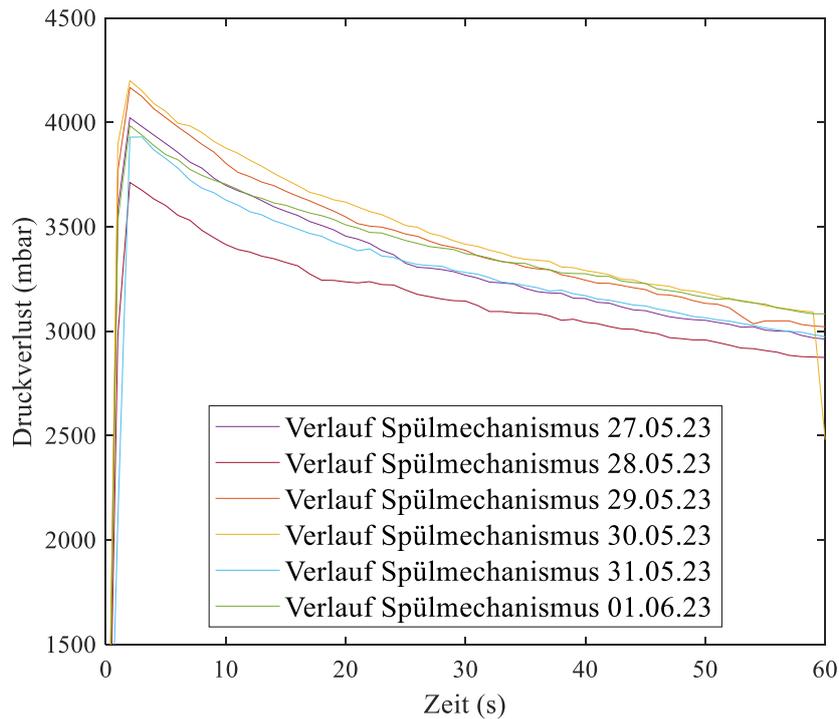


Abbildung 27: Einzelne Verläufe aufgezeichneter Spülstöße im Zeitraum vom 27.05.2023 – 01.06.2023

Die pro Tag erreichten Minimal-, Durchschnitts- und Maximalwerte wurden dabei aus den sekundlich erfassten Werten der oben abgebildeten Verläufe ausgelesen und sind in Abbildung 28 gezeigt. Aus den jeweiligen Minima, Maxima und Durchschnittswerten wiederum wurde dann der Mittelwert der gesamten Reihe berechnet und als gestrichelte Linie dargestellt. Auch die hier dargestellten statistischen Werte bestätigen den größtenteils einheitlichen Verlauf der Spülstöße.

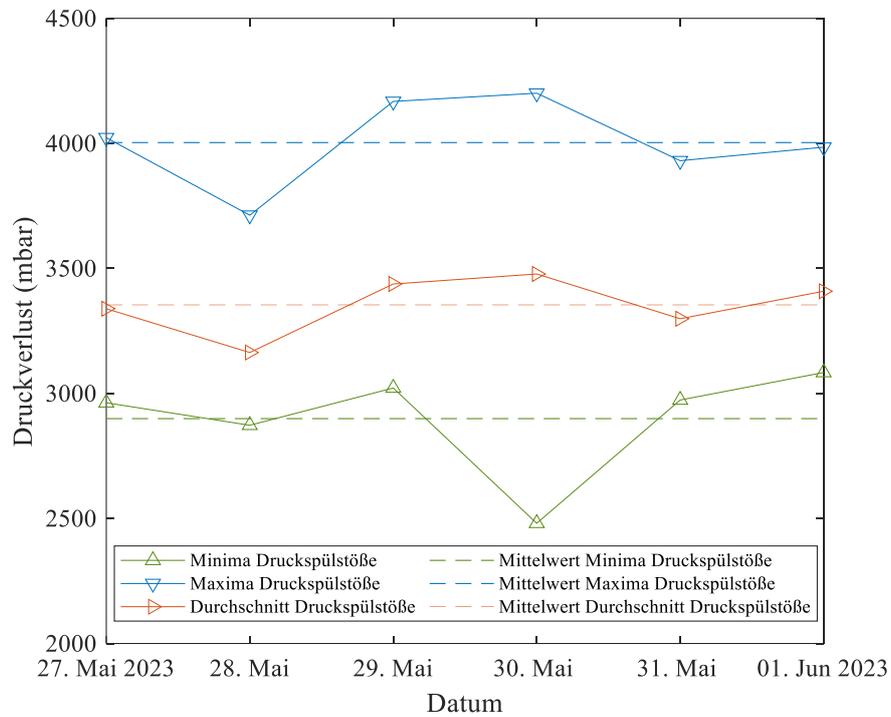


Abbildung 28: Minimal, Durchschnitts-, und Maximalwerte einzelner Spülstöße und der daraus berechnete Mittelwert der Minima, Maxima und der Durchschnittswert der Messreihe (gestrichelte Linie).

Insgesamt kann für diesen Versuch festgehalten werden, dass der Druckverlust über knapp drei Monate erfolgreich begrenzt wurde. Der regelmäßige Druckspülmechanismus konnte erfolgreich angewendet werden. Die Installation und Handhabung der automatisierten Druckspüleinrichtung verliefen unkompliziert und zuverlässig, sodass dieses Konzept durchaus auf anderen Kläranlagen zur Anwendung kommen kann. Die Druckspülungen erweisen sich als ausreichend hoch, wobei in der Spitze etwa 4 bar pro Spülstoß erreicht wurden. Eine täglich einmalige Anwendung der automatisierten Druckspülung wird basierend auf diesen Ergebnissen als ausreichend erachtet. Damit soll auch ein übermäßiger Energieverbrauch durch den Kompressor vermieden werden um die Energiebilanz nicht weiter zu erhöhen. Damit kann dieser Versuchsabschnitt abschließend als positiv bewertet werden.

4.5.2 Robustheits- und Betriebsmonitoring Industriekläranlage

4.5.2.1 Methodik

Die für diese Tests genutzte Kläranlage befindet sich am Standort eines fleischverarbeitenden Betriebs, um die Abwässer aus der Produktion zu behandeln. Die Abwässer stammen hauptsächlich aus den Schlacht-/Verarbeitungsschritten oder aus Reinigungsprozessen zur Aufrechterhaltung der Hygiene. Allgemein handelt es sich bei der Kläranlage um das Belebtschlammverfahren mit Fettvorbehandlung, Vorklärung und einem zweistufigen System (hohe/niedrige Belastung) und einem sich anschließenden Dortmundbrunnen als Nachklärbecken. Hier wurde ein Belebungsbecken als geeignet für das Betriebsmonitoring identifiziert. Das ausgewählte Becken fungiert als intermittierende Stufe für das Belebtschlammverfahren. Der Belüftungsprozess wird auf der Grundlage der Ammoniak-/Nitratkonzentrationen gesteuert, um die Ablaufgrenzwerte einzuhalten. Wenn die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration $> 10 \text{ mg/l}$ ist, wird durch Oberflächenbelüfter Sauerstoff zugeführt. Die Belüftung wird eingestellt, wenn die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration $\leq 7,5 \text{ mg/l}$ ist. Ein Rührwerk sorgt für die Durchmischung während der unbelüfteten Ruhezeiten, während die Oberflächenbelüfter für eine ausreichende Durchmischung des Beckens während der Belüftungszeiten sorgen. In den unbelüfteten Zeiten steigt die Ammoniumkonzentration aufgrund des ständigen Zuflusses von frischem Abwasser aus dem Schlachthofgelände wieder an. Bei $10 \text{ mg/l NH}_4\text{-N}$ nehmen die Oberflächenbelüfter den Belüftungsprozess wieder auf. Eine Besonderheit dieses Versuches war, dass das Becken schräge Seitenwände hat (nicht senkrecht); daher unterscheiden sich die Bodenabmessungen unten von den Beckenabmessungen oben.

Beckenabmessungen: 8 m x 25 m x 3 m (B x L x Wasserstand, Abmessungen des Beckens oben),
4,5 m x 20 m x 3 m (B x L x Wasserstand, Abmessungen unten, verfügbar für
Silikonbegaserrahmen).

Verfahren: Belebtschlamm.

Beckensonden: Sauerstoff, $\text{NH}_4\text{-N/NO}_3\text{-N}$, pH, T.

Belüftung: Oberflächenbelüfter (Mitte der linken und rechten Brücke), jeweils 13 kW
Leistung.

Betrieb: Intermittierend (Belüftung/Nichtbelüftung je nach $\text{NH}_4\text{-N/NO}_3\text{-N}$ -Gehalt).

Rührwerk: Ja, auf der zweiten Brücke (rechte Seite).

Ein Rahmen mit Silikonröhrchen (S1; siehe Abbildung 30) wurde direkt unter der rechten Querbrücke und damit direkt unter einem der Oberflächenbelüfter installiert (siehe Abbildung 29) und an die lokale Reinsauerstoffversorgung angeschlossen. Der Silikonröhrchenrahmen übernahm die Sauerstoffzufuhr und ersetzte den Oberflächenbelüfter in seiner Funktion. An Wochentagen laufen an einem vollen Tag mehr als 30 Phasen pro Tag (Belüftung + Nichtbelüftung), so dass Daten aus

jeder Nitrifikationsphase gesammelt und somit die Betriebssicherheit in diesen Schritten analysiert werden konnte. Im Gegensatz zum Standardbetrieb lief das Rührwerk im Becken auch während der Belüftungsphasen ,um für eine ausreichende Durchmischung zu sorgen, da nur der vordere Oberflächenbelüfter in Betrieb war und daher nur die erste Hälfte des Tanks als vollständig durchmischt galt. Abbildung 29 zeigt ein Luftbild des Versuchsbeckens mit der Versuchsanordnung des Rahmens und der Sauerstoffsonde zur Überwachung der Betriebsverhältnisse. Der Abstand der Bohrungen betrug hier 3,3 mm mit 0,5 mm Abstand vom Scheitel. Die Einstellung des Durchmessers am Laserstrahl lag bei 10 µm. Der Fokuspunkt lag auf der Schlauchoberfläche und die gesamte Schlauchlänge betrug 1100 mm. Die effektive Schlauchlänge im Bereich mit den Bohrungen war 950 mm. Die Größe der Nutenplatte betrug 2000 mm x 995 mm mit 30 Nuten und einem Nutenabstand von 30 mm. Insgesamt waren auf dem Stahlrahmen sechs Nutenplatten mit schlüssiger Anordnung verbaut. Der verwendete 6 m x 2 m Rahmen mit den Silikonröhrchen ist Abbildung 30 dargestellt.



Abbildung 29: Testbecken „Nord“ der Industriekläranlage mit eingesetztem Rahmen (blau gestricheltes Rechteck), mit Standort der Sauerstoffsonde (blauer Punkt) und dem Rührwerk Mitte rechts an der rechten Brücke (orangener Pfeil)- Bildquelle: <https://maps.google.com/>.



Abbildung 30: Bild des 6 m x 2 m Rahmens der Silikonröhrchen auf der Industriekläranlage vor dem Einbau.

Zwei weitere Sonden zur Überwachung der Sauerstoffkonzentration sind direkt mittig über der Blasenfahne des Rahmens platziert, fielen aber kurz nach Versuchsbeginn aus und konnten daher nicht in die Datenauswertung mit einfließen.

Die Datenerfassung basierte auf dem aktuellen Betriebszustand der Kläranlage (wie oben beschrieben). Zu Beginn der Belüftungsperiode startete auch die Belüftung des Rahmens und der Sauerstoffgehalt wurde überwacht. Dann bestimmte die Ammoniumkonzentration die Dauer der Belüftungsperiode. Wenn diese $\leq 7,5$ mg/l war, wurde die Belüftung gestoppt. Bei einer Konzentration von ≥ 10 mg/l begann die Belüftungsperiode erneut.

Insgesamt konnten im Projektrahmen Daten aus ca. 14 Tagen Betrieb berücksichtigt werden. Der Betrieb ist Stand Juni 2025 mit dem Silikonrahmen weiterhin stabil. Ausgewertet wurde mit einem proprietären und in *Python* (Version 3.12.4) implementierten Code. Die Ergebnisse wurden mit der 5-Zahlen-Zusammenfassung in einem Boxplot und Histogramm veranschaulicht. Zur Auswertung der Daten wurde wie folgt vorgegangen:

Fünf-Zahlen-Zusammenfassung (Min-Whisker, Max-Whisker, Mittelwert, oberes und unteres Quartil)

- i) Definition einer Grenze für die Einschaltung/Ausschaltung des Rahmens auf Basis des aufgezeichneten Druckverlustes (an: $p > 0,30$ bar; aus: $p < 0,30$ bar).
- ii) Aussortieren von unplausiblen Sauerstoffwerten aufgrund von Ausfällen der Sauerstoffsonden. In diesem Fall lag die Grenze der Sauerstoffkonzentration für „gültige“ Werte bei ≤ 10 mg/l.

- iii) Berechnung des ersten Quartils (q_{25} , 25. Perzentil), des dritten Quartils (q_{75} , 75. Perzentil), des Mittelwerts, des Median sowie der minimalen und maximalen Whisker-Sauerstoffkonzentrationen sowie Ausreißer des analysierten Datensatzes.
- iv) Boxplot-Darstellung zur Darstellung der erzielten Ergebnisse Vergleich.

4.5.2.2 Ergebnisse

Bevor auf die erzielten Ergebnisse eingegangen wird, soll an dieser Stelle die technische Erfahrung vom Anlagenbetreiber mit einfließen. Nach rund zweiwöchigem Betrieb traten keine betrieblichen Störungen oder Veränderungen auf. Die Rahmen erfüllten bis zur Auswertung der Daten ihren Einsatzzweck und die Kläranlage war in der Lage die Ablaufwerte einzuhalten. Für diesen Projektbericht konnten die Daten von ca. zwei Wochen, 20.05.2025 – 05.06.2025, ausgewertet und dargestellt werden. Der Rahmen verblieb auch nach diesem Projekt im Becken um weitere Betriebserfahrungen zu sammeln. Im Weiteren werden die gewonnenen Daten aus dem Versuch dargestellt bevor eine kurze Auswertung mit Hilfe der in Kapitel 4.3.2.1 erläuterten Methodik gewonnenen Kennzahlen erfolgt. Abbildung 31 zeigt dabei den vollständigen Verlauf der Sauerstoffkonzentration und des Druckverlustes des zweiwöchigen Tests. Die Aufzeichnung der Beckensonde zeigt, dass der Sauerstoffgehalt meist im Bereich von 0,5 – 1,5 mg/l lag. Eine Spitze in der Sauerstoffkonzentration von 2,5 mg/l wurde am 26.05. verzeichnet. Da der Druckverlust nicht stark vom vorigen Betriebsdruck abwich, war evtl. eine kurzzeitige schwache Belastung des Beckens oder eine verminderte Sauerstoffaufnahme der Biologie hier die Ursache, was eine Reduktion der Zehrung und damit einen höheren Sauerstoffübertrag ins Abwasser zur Folge hätte. Am 01./02.06. gab es einen auffällig hohen Druckverlust und eine niedrige Sauerstoffkonzentration. Die Gründe hierfür sind nicht bekannt, evtl. musste kurzfristig die Reinsauerstoffeinspeisung aufgrund einer hohen Abwasserfracht erhöht werden.

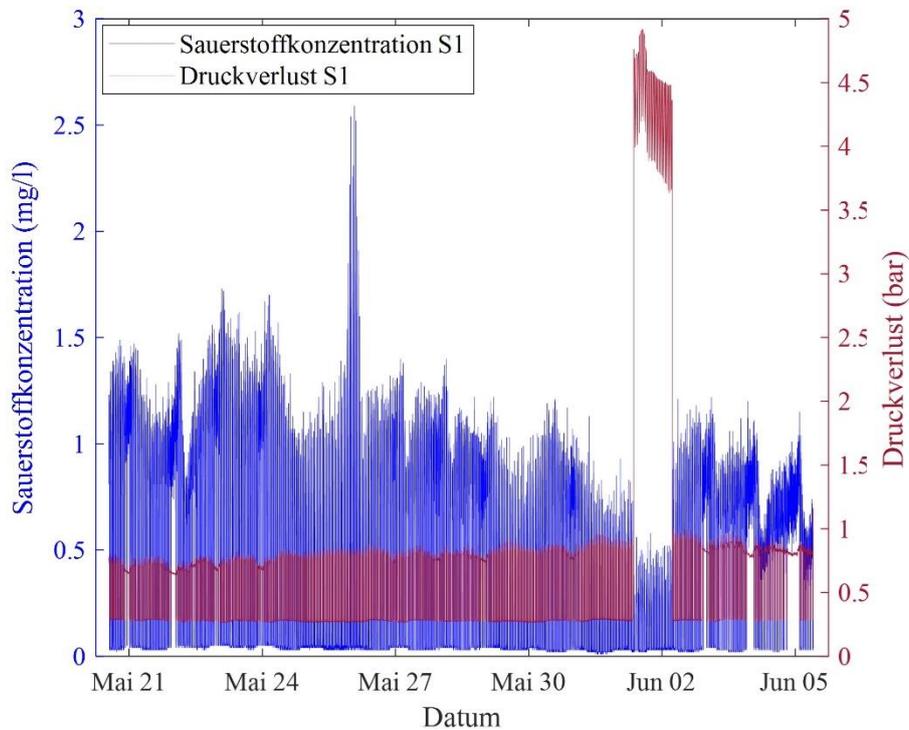


Abbildung 31: Sauerstoffkonzentrationen und Druckverlust des S1-Rahmens während der betrachteten zweiwöchigen Versuchsphase auf der Industriekläranlage.

Eine detaillierte Ansicht vom Konzentrations- und Druckverlauf während der belüfteten und unbelüfteten Phasen ist in Abbildung 32 gezeigt. Die Druckspitzen während der Belüftung lagen im Bereich von 0,7 – 1 bar und es ist eine klare Korrespondenz zwischen Druckverlust und der dann erreichten Sauerstoffkonzentrationen zu erkennen. Bei einem „Anschalten“ des Rahmens war eine Erhöhung der Sauerstoffkonzentration zu beobachten. Während der unbelüfteten Phasen sank die Sauerstoffkonzentration wieder ab. Damit kann zumindest anhand dieser Daten die Einschätzung des Kläranlagenmitarbeiters geteilt werden, dass ein sicherer Betrieb des Rahmens vorlag. Die mittlere Betriebszeit im belüfteten Zustand belief sich auf 23 min. Die hier ersichtlichen „Ein“ und „Aus“-Phasen wurden dann mit der Methodik aus 4.3.2.1 analysiert.

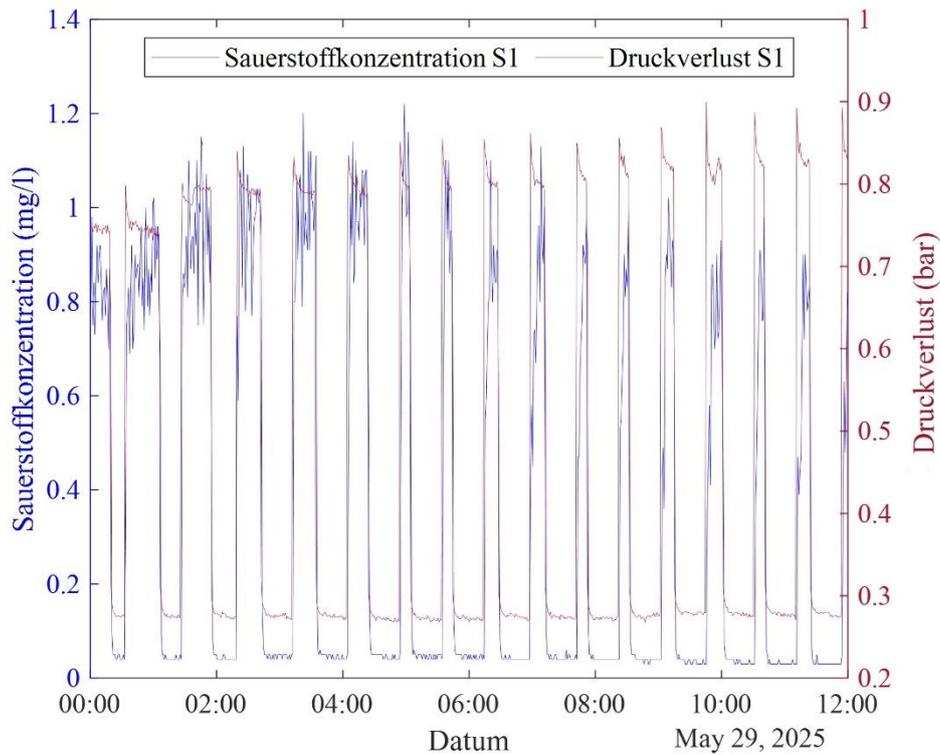


Abbildung 32: Detaillierter Ausschnitt von Belüftungsphasen und Auszeiten vom 29. Mai 2025, 0 – 12 Uhr.

Abschließend soll noch auf die erreichten Sauerstoffkonzentrationen eingegangen werden. Der Boxplot der Sauerstoffkonzentrationen zeigt, dass die Sauerstoffkonzentration in 75% der Fälle $> 0,05$ mg/l war und im Mittel eine Konzentration von $0,42$ mg/l erreicht wurde. Die Sauerstoffspitzen, welche auch in Abbildung 32 ersichtlich sind, stellen hier die Ausreißer dar. Die maximale Konzentration von $2,59$ mg/l wurde am 26.05.2025 erreicht. Eine Übersicht aller Kennwerte ist in Tabelle 4 gegeben. Die niedrigen Werte für das 25% Perzentil und den Median könnten auf eine zeitweise nicht ausreichende Sauerstoffzufuhr zur Anlage hindeuten. Insbesondere am 01./02.06. gab es eine längere Belüftungsphase in welcher nahezu kein Sauerstoff von der Messsonde registriert wurde. Eine betrieblich bedingte hohe Sauerstoffzehrung ist hier sehr wahrscheinlich der Grund. Weiterhin wurden innerhalb der Methodik auf Grundlage Druckverlustes („an“ $\geq 0,30$ bar; „aus“ $< 0,30$ bar) wahrscheinlich auch niedrigere Sauerstoffwerte inkludiert. Nach Ausschalten der Sauerstoffzufuhr kam es, abhängig vom Lastzustand des Beckens, zu einer schnelleren bzw. langsameren Zehrung des Sauerstoffs im Becken und damit zu niedrigen Sauerstoffwerten. Da der registrierte Druckverlust ggü. der Sauerstoffzehrung im Becken langsamer abnahm, war zu beobachten, dass in manchen Belüftungsphasen der Druck noch nicht vollständig abgeklungen war, die Sauerstoffkonzentration im Becken aber schon gegen 0 ging. Diese Werte wurden dann aufgrund des oben genannten Ausschlusskriteriums trotzdem in die Analyse inkludiert.

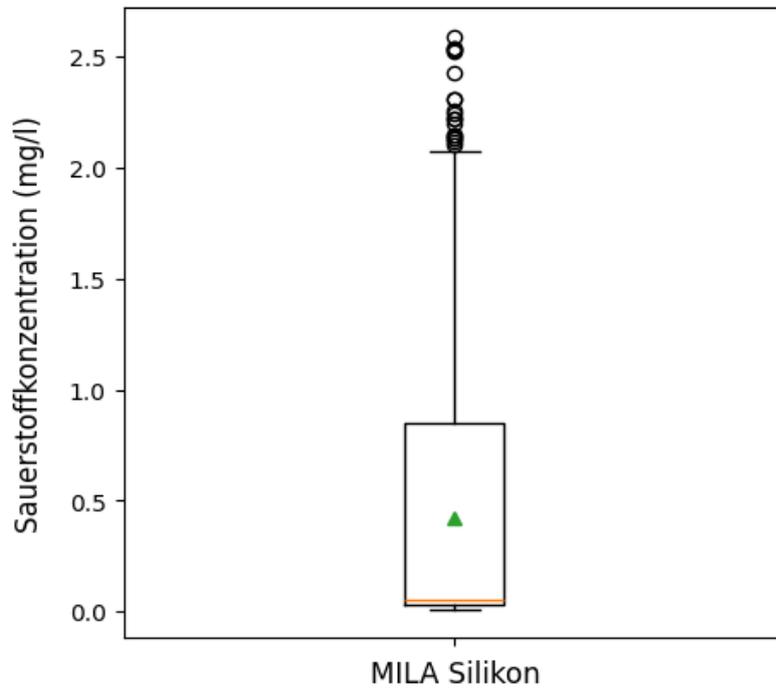


Abbildung 33: Boxplot der Sauerstoffkonzentrationsdatenreihe des MILA-Silikonrahmens „S1“.

Tabelle 4: Kennzahlen des Boxplots des Silikonrahmens „S1“

Eigenschaft	Unterer Whisker O ₂	25% Perzentil O ₂ [mg/l]	Mittelwert O ₂	Median O ₂	75% Perzentil O ₂	Oberer Whisker O ₂	Max. Konzen.O ₂
S1	0.02 mg/l	0.03 mg/l	0.42 mg/l	0.05 mg/l	0.85 mg/l	2.08 mg/l	2.59 mg/l

4.6 Projektbereich IV – Fouling und Beständigkeit (CWT)

Aufgrund des Ausstiegs des Projektpartners Abwasserverband Horlofftal aus dem Projekt und Verzögerungen in der Fertigung der Begaserröhrchen wurde nach Rücksprache mit der DBU entschieden, die Versuche zum Fouling und der Beständigkeit um das Druckmonitoring und das Sauerstoffeintragsverhalten erweitert. Dazu wurde die abwassertechnische Pilotanlage des CLEWATEC genutzt um die Anwendung der bei der EGLV erprobten regelmäßigen automatisierten Druckspülung in der Versuchsanlage des CLEWATEC auf der Kläranlage Ottendorf-Okrilla der Stadtentwässerung-Dresden (SEDD) weiter zu untersuchen und dabei gleichzeitig das Sauerstoffeintragsverhalten zu überwachen.

4.6.1 Material und Methodik Pilotversuche CLEWATEC

Projektbegleitend wurde ein Modul 0,5 m x 1 m mit dem Linearbegaser „alt“ zur Untersuchung des Fouling-Verhaltens im Langzeitbetrieb im Belebungsbecken der Kläranlage Ottendorf-Okrilla über einen Zeitraum von 2 Jahren betrieben (siehe Abbildung 34). Das Modul wurde direkt über die Druckluftleitung der Kläranlage versorgt und der Druckverlust sowie der Luftvolumenstrom mit einer lokalen Instrumentierung überwacht. Hierbei wurden initiale Versuche zur Druckspülung mit einem separaten Kleinkompressor durchgeführt, aus denen später die Konfiguration der Druckspülvorrichtung abgeleitet wurde. Das Modul wurde zunächst bis zum Erreichen eines stabilen Druckverlusts bedingt durch das Fouling im kontinuierlichen Modus betrieben. Danach wurden wöchentlich Druckspülstöße mit einem Kleinkompressor durchgeführt. Hierbei wurden die Druckniveaus von 2 bar, 4 bar und 6 bar getestet und sowohl statisch wie mehrfach gepulst



angewendet.

Abbildung 34: Installiertes Modul mit Linearbegaser „alt“ für Fouling-Tests an der Kläranlage Ottendorf-Okrilla.

Zur Bewertung der Leistung des MILA-Belüfters wurde im späteren Projektverlauf die CLEWATEC Pilotanlage mit zwei Versuchsbehältern (je 14 m³ Behältervolumen) und Messgeräten auf der Kläranlage Ottendorf-Okrilla in der Nähe von Dresden genutzt, welche vergleichende Abwasserversuche ermöglicht. Die Leistung des MILA-Belüfters wurde in einem kontinuierlichen Nitrifikationsversuch mit Belüftung der Schlammkulturen bewertet. Darüber hinaus werden die MILA-Belüfter mit handelsüblichen Tellerbelüftern bei ähnlichen Betriebsbedingungen verglichen. Tabelle 5 enthält die wesentlichen Informationen über die Kläranlage und ihre Abwassereigenschaften. Die Versuchsanlage befindet sich in der genannten Kläranlage zwischen den Belebungsbecken. Abbildung 35 zeigt ein Satellitenbild der Kläranlage zusammen mit der Versuchsanlage.

Tabelle 5: Generelle Informationen zur Kläranlage Ottendorf-Okrilla.

Informationen Kläranlage Ottendorf	
Systemdesign	Belebtschlammverfahren
Ausbaugröße (aktuelle Anschlussgröße)	26 000 (14 000)
Durchschnittlicher Zufluss (2019)	3589 m ³ /d
Rohabwasser CSB	545 mg/l
Rohabwasser BSB	219 mg/l
Rohabwasser NH₄-N	54 mg/l
Rohabwasser PO₄-P	9 mg/l
Vergleichsschlammvolumen (VSV)	368 ml/l
Trockensubstanzgehalt (TS) Belebung	3,7 mg/l

Die mobile Forschungseinrichtung umfasst zwei identische Versuchsbehälter, welche für experimentelle Untersuchungen vor Ort in einer gewünschten Kläranlage eingesetzt werden können. Die Becken haben eine rechteckige Form mit Abmessungen von 4,0 x 1,7 x 2,5 m³ und einem Vollvolumen von ca. 17,0 m³. Die maximal mögliche Belüftungstiefe in den Becken beträgt ca. 2,1 m, woraus sich 14,3 m³ als Prozess-/Arbeitsvolumen für die Bewertung der Belüfterleistung ergeben. Die Untersuchungen können parallel durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass die Versuchsbecken die gleichen Versuchsbedingungen aufweisen und somit eine adäquate Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist. Die Versuche werden mit Belebtschlamm aus der Standortkläranlage Ottendorf-Okrilla durchgeführt. Abbildung 36 zeigt die Versuchsbeckenanlage von oben und von vorne.



Abbildung 35: Satellitenbild der Kläranlage Ottendorf, Einsatzort des Moduls für Fouling-tests (blauer Kreis) und Ort der Versuchsanlage (orangener Kreis) – Bildquelle: <https://maps.google.com/>.

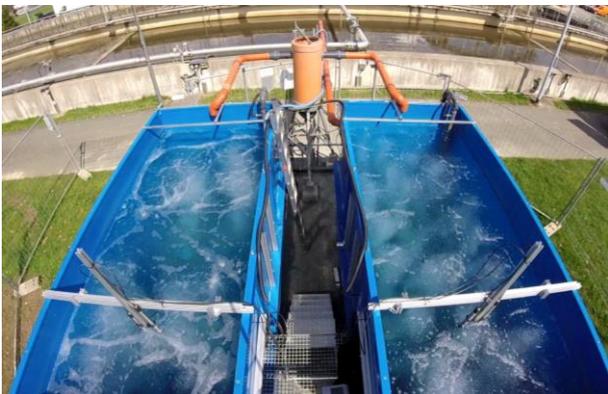


Abbildung 36: Versuchsanlage des CLEWATEC als Drauf- (links) und Frontsicht (rechts).

Um Störungen oder Beeinträchtigungen des Prozesses im Belebungsbecken auszuschließen, wurden die Nitrifikationsexperimente im Bypass durchgeführt. Belebtschlamm aus der Denitrifikationszone der Kläranlage wurde in die Testbecken gepumpt. In der Deni-Zone liegt kein gelöster Sauerstoff vor, nur Ammonium und minimal Nitrat ($\approx 0,5 \text{ mg/l}$). Dies ermöglicht einen kontrollierten Nitrifikationsprozess des vorhandenen Ammoniums, um die Leistung des Belüfters zu bewerten und gleichzeitig die Versuchsbedingungen zu überwachen. Während der Versuche wurde für die Belüftung in beiden Versuchsbehältern jeweils ein Massenvolumenstrom von 100 sl/min eingestellt, um die Leistung des Diffusors zu untersuchen. Auf der Grundlage dieses Massendurchflusses wurden Parameter wie die Konzentrationen von gelöstem Sauerstoff (O_2), Ammonium ($\text{NH}_4\text{-N}$) und Nitrat

(NO₃-N) gemessen und der Druckverlust überwacht. Der Vergleich berücksichtigt die erreichte Konzentration an gelöstem Sauerstoff und die Entwicklung des Druckverlustes über die Versuche hinweg. Außerdem werden die erreichten Ammoniak- und Nitratkonzentrationen ausgewertet.

Die zur Überwachung der oben genannten Parameter (und weiterer) genutzte Instrumentierung, Hardware und Software wird in einem Container betrieben,

Der Container enthält die folgende Messinstrumentierung:

- Durchflussregelungs- und Überwachungseinrichtungen (Massendurchflussmesser + Regelventil)
- Schmutzwasserpumpe mit Frequenzumrichter
- Gebläseeinheit mit einer maximalen Leistung von 220 sl/min (Atlas-Copco, SF 1)
- Abwasserdurchflussmesser (magnetisch-induktive Durchflussmesser)
- Steuereinheit für verschiedene Messsonden (T, pH, NO₃-N, NH₄-N, O₂)
- Computereinheit zur Bedienung, Aufzeichnung und Überwachung der Bedingungen in den Versuchscontainern

Abbildung 37 zeigt ein vereinfachtes R&I der Prüfanlage (Tanks und Messcontainer). Die Abwassertauchpumpe ist im Belebungsbecken (Belebungsbecken eins, Denitrifikationszone zwei) der Hauptkläranlage für die Belebtschlammzufuhr installiert. Über ein Quetschventil wird der Abwasserzustrom in die Behälter eingestellt. Der Belebtschlamm strömt durch die im Container installierten Flüssigkeitsdurchflussmesser (MID-Verfahren) und wird dann in die Becken geleitet.

Der Massendurchfluss wird durch Proportionalventile in Verbindung mit Massendurchflussmessern für Standardbedingungen (Standardbedingungen: 1,01325 bar bei 20 °C) überwacht und geregelt. Die Massendurchflüsse für jeden Tank werden separat überwacht und geregelt. Eine Zuleitung vom Behälter zum Tank sorgt für die Einspeisung durch die installierten Belüftungssysteme. Ein Prozesskontrollsystem stellt den gewünschten Massendurchfluss sicher – in diesem Fall 100 sl/min.

In jedem Behälter wurden Überwachungssonden für Sauerstoff, Ammonium, Nitrat, Temperatur und pH-Wert installiert. Die Steuereinheit im Inneren des Behälters empfängt die Signale von den Sonden. Zusammen mit dem erforderlichen Massendurchsatz ermöglichen die erreichten Sauerstoff-, Ammoniak- und Nitratkonzentrationen eine Bewertung der Leistung der Begaserröhrchen gegenüber dem kommerziellen Belüftungssystem. Außerdem wurden die Eingangs-Konzentrationen von Ammoniak und Nitrat mit einer weiteren ISE-Sonde gemessen. Daher wurde diese Ammonium-/Nitrat-Sonde in der Nähe der Zulaufpumpe angebracht. Die Leistungsbewertung wird anhand der in Tabelle 6 aufgeführten Parameter durchgeführt. Weitere Informationen über die verwendete Ausrüstung ist in

Tabelle 7 zu finden. Zwei 1 m x 1 m große MILA-Module (lineare Belegung) wurden in Tank eins installiert. In Tank 2 wurden 18 Tellerbelüfter betrieben. Dies resultiert in einer Belegungsdichte von 17,7% für die MILA-Module sowie 14,6% für die Tellerbelüfter. Mit 18 Tellerbelüftern wurde in Tank zwei die höchstmögliche Belegungsdichte hergestellt. Es konnte somit eine annähernd gleiche Belegungsdichte hergestellt werden. In Abbildung 38 sind die eingebauten Belüfter in den Tanks abgebildet.

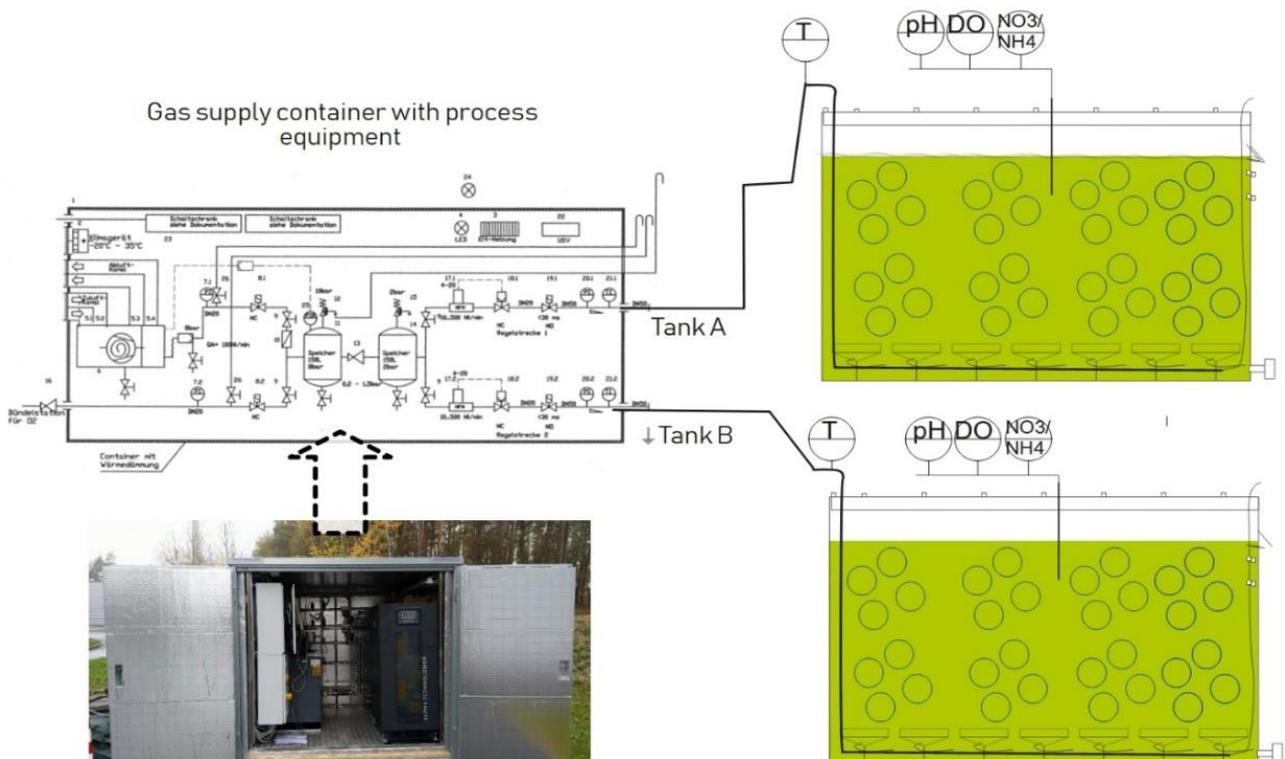


Abbildung 37: Vereinfachtes Fließschema und Aufbau des Messcontainers und der Versuchstanks.

Tabelle 6: Versuchsbedingungen der Nitrifikationsexperimente auf der Kläranlage Ottendorf-Okrilla.

Eigenschaft	MILA (PA1)	Tellerbelüfter
Anzahl Begaserröhrchen (je 1 m)/Anzahl Tellerbel.	64	18
Belüfteroberfläche (je Röhrchen/Teller)	0.019 m ²	0.055 m ²
Gesamtfläche Belüfterfläche	1.21 m ²	0.99 m ²
Belegungsdichte je Tank	17,7%	14,6%
Einblastiefe	2.10 m	
Belebtschlammzufluss	2 – 3,5 m ³ /h	
Massenvolumenstrom	100 sl/min	
Sauerstoffkonzentration	Variabel	
Untersuchte Parameter	Druckverlust, gelöst-O ₂ , NH ₄ -N und NO ₃ -N Konzentrationen	

Tabelle 7: Spezifikation des genutzten Messequipments.

Sensor	Messbereich	Genauigkeit	Ansprechzeit	Betriebsbereich	Auflösung
Sauerstoffsensoren (WTW FDO@700 IQ, Deutschland)	0...20 mg/l	< 1 mg/l: $\pm 0,05$ mg/l > 1 mg/l: $\pm 0,1$ mg/l	t90: < 60 s t95: < 80 s	pH: 2-10	0.01 mg/L
NH4-N-Sensoren (WTW VARI@Plus 700 IQ with K ⁺ compensation, Deutschland)	0.1...100mg/l	$\pm 5\%$	-	pH: 4...8 p _{max} : 0.2 bar	0.10 mg/L
NO3-N-Sensoren (WTW VARI@Plus 700 IQ ⁺ , Germany)	0.1...100 mg/l	$\pm 5\%$	-	pH: 4...11 p _{max} : 0.2 bar	0.10 mg/L
pH-Sensoren (WTW SensoLyt@ 700 IQ, Deutschland)	0...14 pH	$\pm 0,2$ pH	-	0...14 pH	0.01 pH
Massedurchflusssensor (Omega FMA1600, USA)	0...250 slm	$\pm 0.8\%$ rd ¹ & 0.2% FS ²	≤ 10 ms	T: -10 ... 50°C	-
MID Durchflusssensor (ISOIL, ISOMAG MS2500, Italien)	0...63 m ³ /h	$\pm 0.8\%$ rd ¹	-	T: 0°C - 60°C	0.01 m ³ /h



Abbildung 38: Eingebaute Belüfter in den Tanks; Tellerbelüfter Tank 2 (links), MILA Tank 1 (rechts).

¹ Rd: reading (read or measured value)

² Fs: full scale

4.6.2 Ergebnisse Fouling, Beständigkeit und Eintragsverhalten CLEWATEC

4.6.2.1 Langzeitbetrieb Linearbegaser „alt“

Das in der Belebung eingesetzte Modul Linearbegaser „alt“ zeigte zu Beginn einen Druckverlust von ca. 80 mbar. Dieser stieg während des kontinuierlichen Betriebs im ersten Monat bedingt durch Fouling auf ca. 300 mbar an (siehe Abbildung 40). Die darauf folgenden Druckspülvorgänge führten erst ab einem Druck von 4 bar zu einer zuverlässigen Reduktion des Druckverlusts auf ein stabiles Niveau von 140 mbar. Die mehrfache Pulsung bei 4 bar zeigte hierbei keinen signifikanten Vorteil gegenüber der statischen Beaufschlagung. Dieser Betrieb konnte so über mehrere Monate stabil aufrechterhalten werden.

Nach einer längeren Betriebspause war der Druckverlust auf ein Niveau von 500 mbar angestiegen. Nach der Wiederinbetriebnahme wurden wöchentlich die verschiedenen Ansätze zur Reinigung verfolgt (siehe Abbildung 40). Da die drei Druckniveaus der Spülung von 2 bar, 4 bar und 6 bar kein ausreichendes Rücksetzen des Druckverlustes erlaubten, wurde eine Spülung mit Essigsäure erwogen. Hierbei wurde die Begaserzuleitung mit Essigsäure gefüllt und dann mit Druckluft bei 6 bar aus der Leitung durch die Röhrchen gedrückt. Dieser Vorgang wurde danach einmal wiederholt. Wie in Abbildung 40 zu sehen ist, konnte der Ausgangsdruckverlust des Linearbegasers „alt“ von 80 mbar mit dieser einfachen Methode nahezu wieder hergestellt werden.

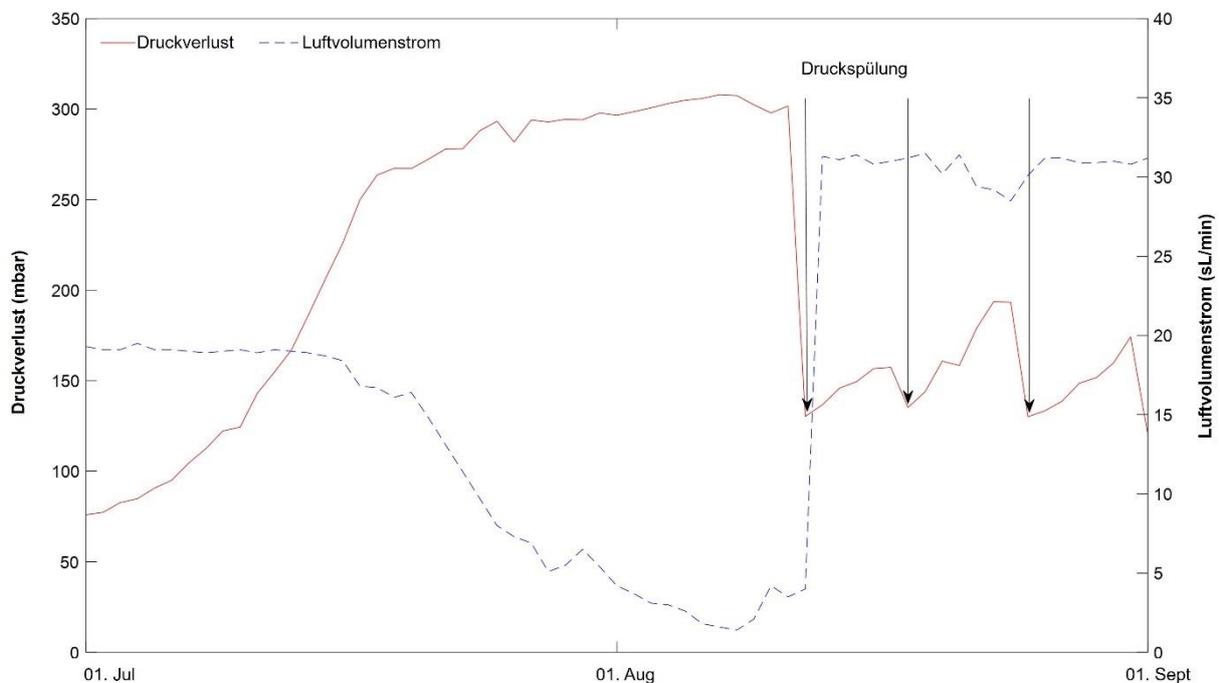


Abbildung 39: Betriebsverhalten des Moduls Linearbegaser „alt“ während des Langzeittests in der Belebung der Kläranlage Ottendorf-Okrilla

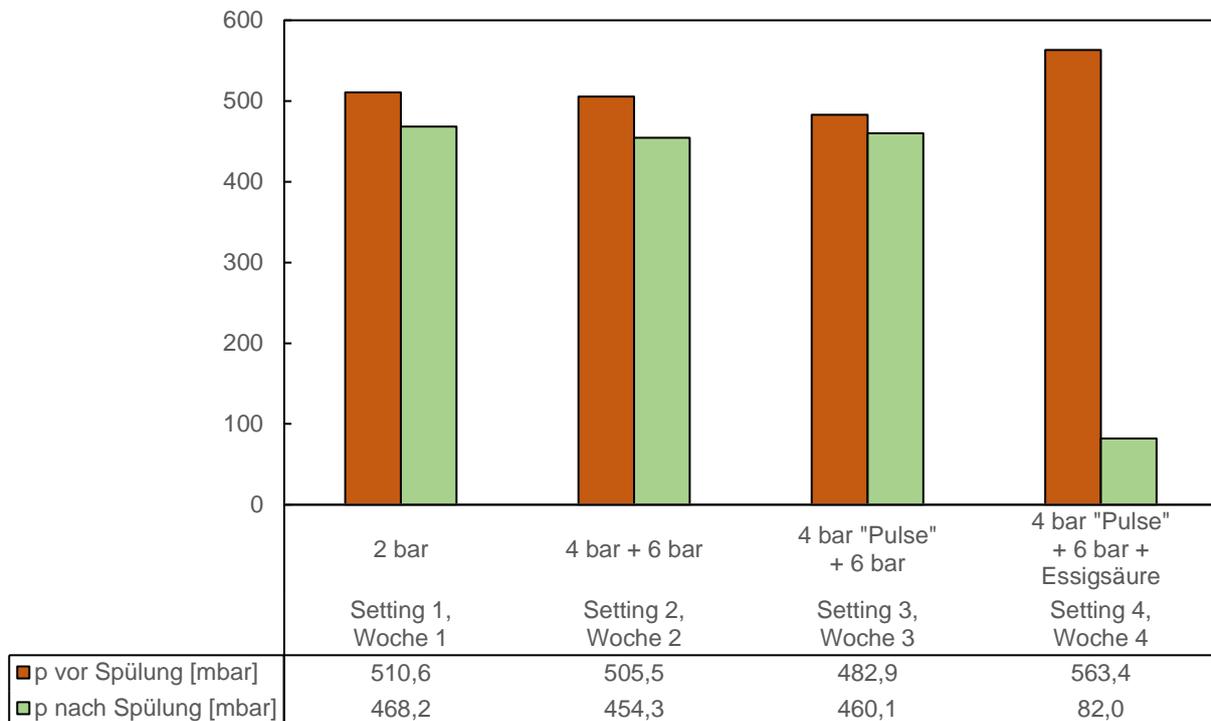


Abbildung 40: Rücksetzen des Druckverlustes des Linearbegasers in der Konfiguration „alt“ (siehe Kapitel 4.3.2) durch verschiedene Spül-/Reinigungsmethoden nach einer langen Betriebspause.

4.6.2.2 Pilotversuch MILA-Begaser

Nach der Installation der Belüfterrahmen in den beiden Tanks der Versuchsanlage folgte eine kurze Testphase von ca. 5 Tagen, um die Belüfter und die Tanks einzufahren. Anschließend wurde mit den Tests für dieses Projekt gestartet. Der Spülvorgang erfolgte in diesem Versuche aller 12 h für 45 s mit derselben Spülstoßapparatur wie bei den Versuchen der EGLV (vgl. Kapitel 4.5.1). Die Druckversorgung für die Spülstöße kam aus einem Vorlagedruckbehälter mit einem Mindestdruck von 6 bar. Die in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse umfassen einen Zeitraum vom 12.02.2025 – 18.02.2025. Am frühen Morgen des 18.02. (gg. 5:30 Uhr) fiel die Belüftung aufgrund eines zugefrorenen Kondensatableitungsschlauchs aus. Damit konnte die Druckluftversorgung nicht aufrechterhalten werden. Aufgrund der in Teilen manuellen Prozesssteuerung wurde der Ausfall erst ein paar Stunden später festgestellt. Da die Pumpe daher erst Stunden später ausgeschaltet werden konnte, füllten sich die Tanks mit Schlamm und ein weiterer Betrieb war nicht möglich. Aus organisatorischen Gründen konnte zudem die Leerung und Säuberung der Tanks erst ca. 2 Wochen später erfolgen. Die Belüfter mussten daher für diesen Zeitpunkt im Schlamm verbleiben. Nach Reinigung der Tanks wurden die Belüfter zunächst oberflächlich mit Wasser gereinigt. Anschließend wurden die MILA-Belüfterplatten einem Drucktest unterzogen. Hierbei wurde ein Druckverlust von ca. 2 bar festgestellt. Da der Druckverlust damit viel zu hoch und ein effizienter Betrieb damit nicht schlüssig schien, erfolgte eine Vollreinigung der MILA-Belüfterrohre. Dazu wurden zunächst alle auf den Konturen verbauten Rohre ausgebaut und über Nacht in einen Eimer mit 15%iger Essigsäure eingelegt. So sollte evtl. gebildete Salzverkrustungen gelöst werden. Nach dem Einweichen wurden

die Röhren einzeln getaucht in einem Eimer Wasser mit Druckluft (+ 4 bar) gespült. Nachdem diese Prozedur mit allen ausgebauten Röhren vollzogen wurde, fand ein erneuter Druck- und Dichtigkeitstest der Module statt um die Wirksamkeit der Reinigung zu beobachten. Es musste dann aber festgestellt werden, dass die MILA-Konturen den ursprünglichen Druckverlust von ca. 160 mbar nicht mehr erreichten. Nachdem erneuten Einbau der Röhren wurde ein Startdruck von > 600 mbar registriert. Dies wurde weiterhin als zu hoch erachtet, da dies eine Vervierfachung des Anfangswertes darstellt und ein solch hoher Druckverlust auch bei hohen Effizienzgraden nicht wirtschaftlich erschien. Die Versuche wurden daher am 18.02.2025 aufgrund des hohen Druckverlustes und aufgrund des verbliebenen engen Zeitraums bis zum Projektende (Projektende: 31.03.2025) beendet und nicht weiter fortgeführt.

Trotz der Herausforderungen beim Betrieb wird nachfolgend auf die erzielten Ergebnisse eingegangen. Abbildung 41 zeigt die Sauerstoffkonzentration in den Tanks und gleichzeitig die Zuflussmenge des Abwassers in die Tanks und den angewendeten konstanten Luftvolumenstrom. Es ist klar zu erkennen das bei gleicher Belastung ein höherer Sauerstoffeintrag vom MILA-System erreicht wurde. Im Mittel lag der O₂-Wert bei etwa 7,2 mg/l für MILA und bei 6,2 mg/l für die Tellerbelüfter. Dies entspräche einer Steigerung der O₂-Konzentration im MILA-Tank um ca. 17%. Zum Vergleich sind die observierten NH₄-N- und NO₃-N-Konzentrationen, sowie der pH-Wert und Temperatur in Abbildung 42 dargestellt. Die Nitratsonde musste aufgrund einer Sensordrift erneut kalibriert werden. Insgesamt zeigten beide Tanks ein sehr ähnliches Verhalten ohne größere Unterschiede. Die Ammoniumwerte der Sonde lagen stetig bei 0,1 mg/l, was gleichzeitig den Minimalwert darstellt. Aus Laborbestimmungen mit Küvetten ist aber bekannt, dass die nachgewiesenen Ammoniumwerte gegen 0 mg/l gingen. Somit kann die Annahme getroffen werden, dass keine Schwierigkeiten in der Sauerstoffversorgung und damit der Nitrifikation auftraten (auch aufgrund der verhältnismäßig hohen O₂-Konzentrationen), obwohl die Wassertemperatur in den Tanks niedrig war (6°C – 9°C). Insgesamt wurde für die kurze Laufzeit ein stabiler Betriebszustand erreicht. Tabelle 8 fasst nochmal die observierten Parameter und deren erzielte Mittelwerte und die Standardabweichungen der Messreihe zusammen.

Auch der Druck wurde bis zum Abbruch der Versuche überwacht. Abbildung 43 und Abbildung 44 zeigen den Druckverlust von den MILA-Rahmen und den Tellerbelüftern. Abbildung 43 zeigt den Druckverlust mit Spülstößen (nur MILA) und Massenvolumenstrom der beiden Belüftertypen. Die Spülstöße funktionierten planmäßig. Am 13.02. wurde ein erhöhter Druckverlust registriert, die Ursache ist aber nicht auf einen Spülstoß zurückzuführen da dieser erst kurz danach angewendet wurde. Die MILA-Rahmen wurden an diesem Tag zur Kontrolle kurz aus dem Abwasser gehoben. An diesem Tag wurde vorsichtshalber auf Undichtigkeiten infolge der Spülstöße kontrolliert. Beeinträchtigungen des Rahmens oder der Verbindungen wurden jedoch nicht entdeckt und der

Rahmen zur Fortführung der Versuche wieder abgelassen. Abbildung 44 zeigt den Druckverlust beider Belüfter nochmal etwas detaillierter ohne Druckstöße. Die Tellerblüfer wiesen wie erwartet einen stabilen Druckverlust von ca. 40 mbar auf. Der Druckverlust der MILA-Rahmen lag bei etwa 160 mbar. Das Herausziehen der MILA-Rahmen am 13.02. führte zu einem Absinken des Druckverlustes um ca. 20 mbar. Der Druckverlust glich sich im Laufe der Versuchswoche wieder an und lag kurz vor dem Abbruch wieder bei ca. 160 mbar. Die Gründe für die Abnahme nach dem Wiedereintauchen sind nicht bekannt. Ein Eindringen von Wasser oder Schlamm oder grobe Verschmutzungen auf den Rahmen sind auszuschließen, da der Luftvolumenstrom während des Anheben nicht abgeschaltet wurde. Insgesamt war der Druckverlust zumindest für diesen Zeitraum stabil. Eine abschließende Beurteilung der Eintragungseffizienz und der erzielten Wirtschaftlichkeit ist auf Basis dieser Datenbasis jedoch nur begrenzt möglich.

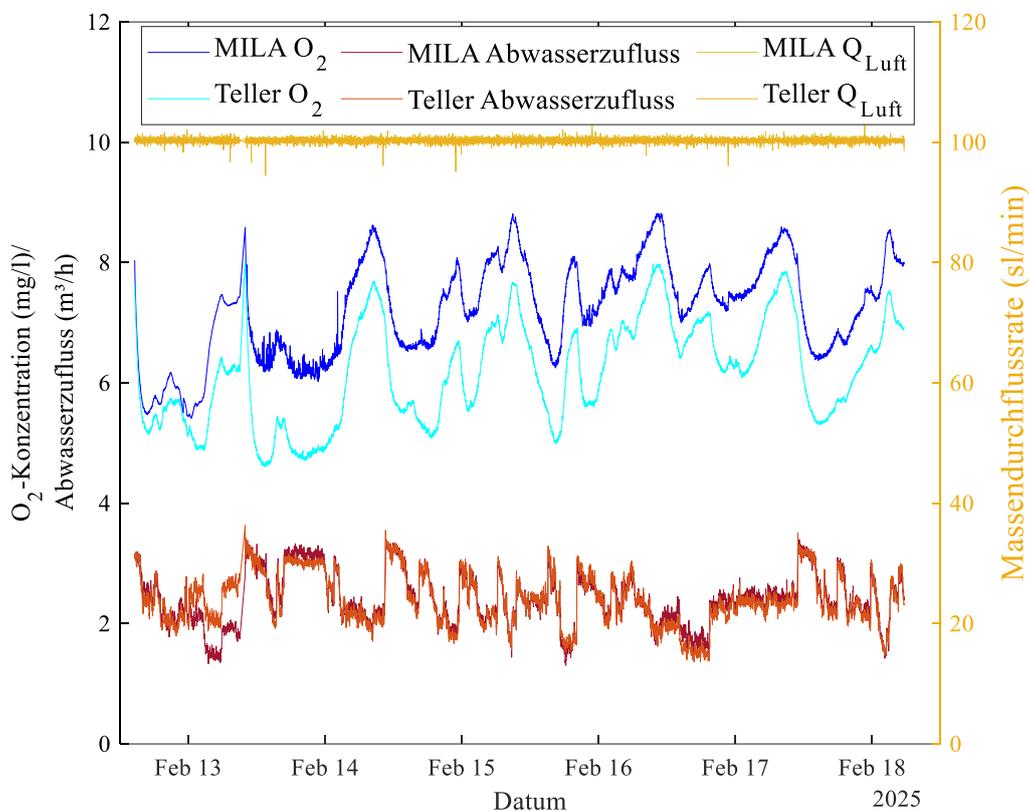


Abbildung 41: Sauerstoff, Luftmassenvolumenstrom und Abwasserzuflussstrom der beiden Tanks.

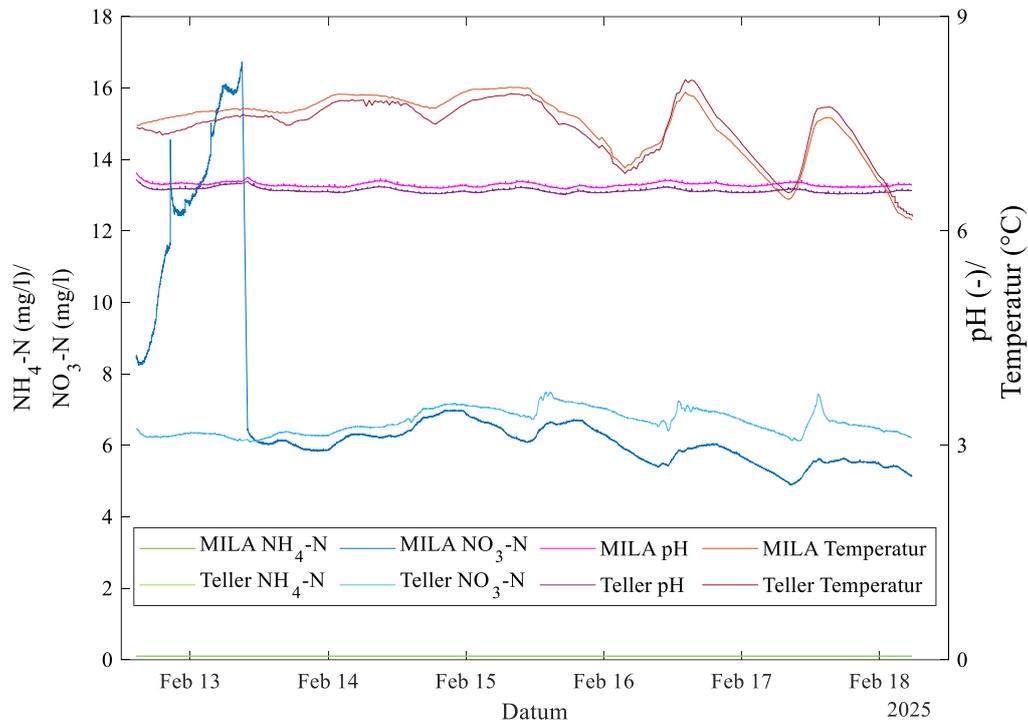


Abbildung 42: NH₄-N- und NO₃-N-Konzentrationen (linke y-achse), pH-Wert und Temperatur (rechte y-Achse).

Tabelle 8: Zusammenfassung der observierten Parameter als Mittelwert und deren Standardabweichung für den Messzeitraum.

Parameter	Einheit	Mittelwert	Standardabw.
Abwasserzufluss MILA	m ³ /h	2.4	0.44
Abwasserzufluss Teller		2.4	0.43
O ₂ -Konzentration MILA	mg/l	7.2	0.81
O ₂ -Konzentration Teller		6.2	
Massedurchfluss MILA	sl/min	100	0.34
Massedurchfluss Teller		100	0.28
NH ₄ -N-Konzentration MILA	mg NH ₄ -N/l	0.1	0.00
NH ₄ -N-Konzentration Teller		0.1	0.00
NO ₃ -N-Konzentration MILA	mg NO ₃ -N/l	6.9	2.54
NO ₃ -N-Konzentration Teller		6.7	0.34
pH-Wert MILA	[-]	6.6	0.03
pH-Wert Teller		6.6	0.03
Temperatur MILA	°C	7.5	0.43
Temperatur Teller		7.4	0.48

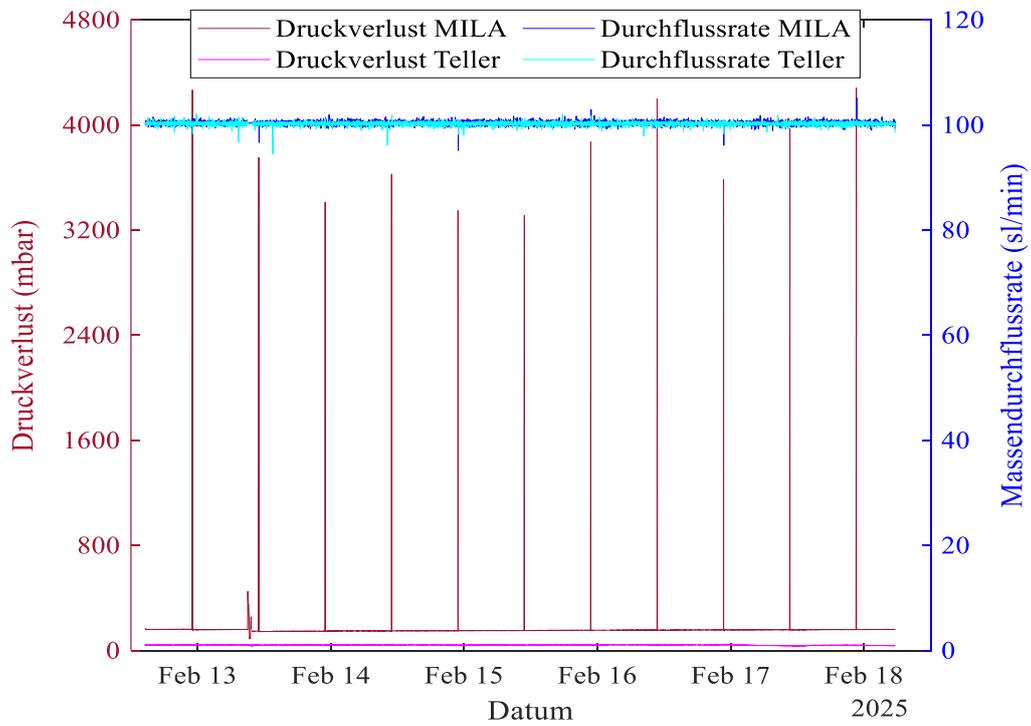


Abbildung 43: Druckverlust (ohne Wassersäule) mit Spülspitzen und Massedurchfluss für die Experimente in Ottendorf-Okrilla.

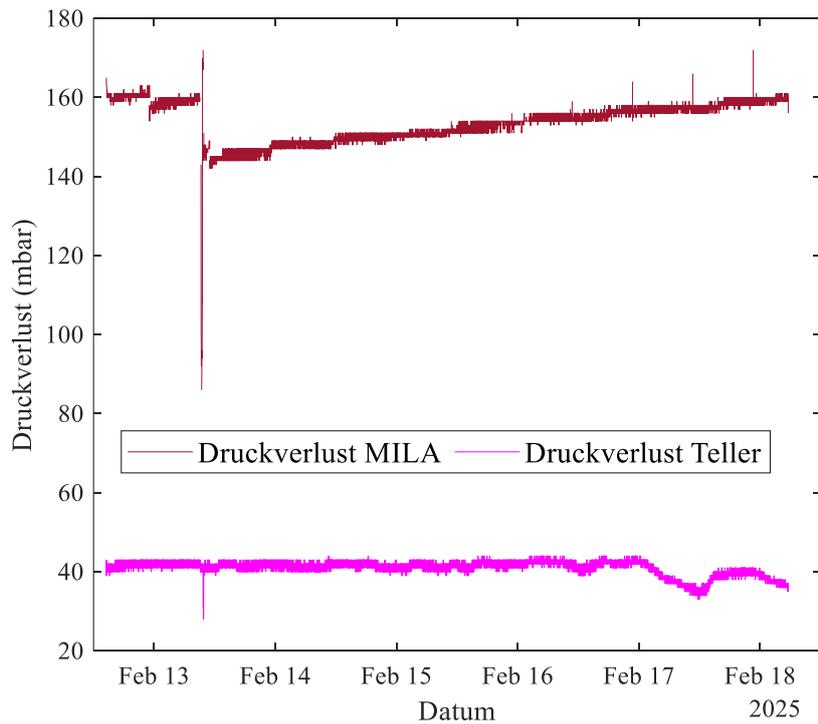


Abbildung 44: Druckverlust (ohne Wassersäule, ohne Spülstöße) von den Belüftern „MILA“ und den eingebauten Tellerbelüftern im Vergleich.

4.7 Projektbereich V – Ergebnisbewertung

Fertigung der Löcher wahrscheinlich entscheidend für Druckverlustanstieg und Wiederherstellung des Ausgangszustandes (siehe evtl. Diagramm vorversuche)

Die mittels Videometrie untersuchte Blasenbildung an den gelaserten Öffnungen des MILA-Begasers zeigt den erzielten fluiddynamischen Effekt kleiner Gasblasendurchmesser von generell deutlich unter 2 mm und hinunter bis zu 1,4 mm für PA1. Die dadurch zu erwartende Effizienzsteigerung beim Sauerstoffeintrag zeigte sich in den Technikumsversuchen deutlich. Zudem konnte auch die Kompensation des höheren Druckverlustes in der Gesamteffizienz sowohl gegenüber dem Standardmembranbelüfter als auch gegenüber Linearbegaser „alt“ anhand des höheren SAE gezeigt werden. Hier spiegelt sich insbesondere der gegenüber dem Linearbegaser „alt“ deutlich reduzierte Druckverlust durch die reduzierte Rohrwanddicke wieder. ,

Dennoch wurde in diesen Versuchen eine Variation des Öffnungsgrades der Begaserröhrchen beobachtet. Diese sind anhand der REM-Untersuchungen sichtbar und auf Fertigungstoleranzen zurückzuführen. Die Reduktion dieser Toleranzen sollte ein wesentlicher Punkt bei der zukünftigen Weiterentwicklung der Fertigungstechnologie sein.

Das Monitoring des Betriebsverhaltens des MILA-Begasers im Technikum der EGLV zeigte einen stabilen Betrieb mit Spülstößen für ca. 3 Monate trotz kurzfristigem Ausfall. Dies bestätigte die positiven Erfahrungen aus dem Langzeitbetrieb mit dem Modul des Linearbegaser „alt“ an der Kläranlage Ottendorf-Okrilla, bei welchem der während einer längeren Betriebspause durch Fouling entstandene Druckverlust nahezu auf zurückgesetzt werden konnte.

Bei dem Pilotversuch des MILA-Begasers an der CLEWATEC Versuchsanlage auf der Kläranlage Ottendorf-Okrilla war der Druckverlust kurzfristig stabil und das Sauerstoffeintragsverhalten effizienter als beim Vergleichssystem. Nach einer längeren Stillstandzeit von ca. 2 Wochen war eine deutliche Erhöhung des Druckverlustes vorhanden. Entgegen der Erfahrung mit Linearbegaser „alt“ konnte jedoch der Druckverlust mit Anwendung eines Säurebads und anschließender Druckspülung (> 4bar) der Röhrchen nicht wieder vollständig zurückgesetzt werden.

Es ist zu schlussfolgern, dass ein Wiederauffahren des MILA-Begasers nach kurzem Ausfall wahrscheinlich unproblematisch in Bezug auf Effizienz und Druckverlust (< 48 h) ist. Längere Ausfallzeiten führten zu einem hohen bleibenden Druckverlust. Mögliche Ursache könnten Verblockungen im konischen Bohrkanal (vgl. REM-Bilder; Außen- zu Innendurchmesser) sein. Ein zylindrischer Bohrkanal wie bei Linearbegaser „alt“ scheint weniger anfällig für Verblockungen zu sein. Zudem ist der Öffnungsgrad der Bohrungen über die Begaseroberfläche inhomogen, wodurch Bohrungen mit kleinerem Durchmesser tendenziell weniger stark beaufschlagt bzw. gereinigt werden.

Insgesamt konnte in diesem Versuch eine gesteigerte Eintragungseffizienz gegenüber dem Vergleichssystem erreicht werden und das hohe Potential für Energieeinsparungen war ersichtlich.

Die Reduktion der Fertigungstoleranzen in Kombination mit einer zylindrischen Lochgeometrie sollten ein wesentlicher Bestandteil der Weiterentwicklung der Fertigungstechnologie sein, um ein stabiles Betriebsverhalten erreichen zu können auch wenn nach längerem Ausfall bzw. Stillstand wieder angefahren werden soll. Dies gilt insbesondere für die Anwendung von MILA bei intermittierend betriebenen oder SBR-Anlagen.

4.7.1 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse für den MILA-Begaser ist als Modellrechnung angelegt. In die Rechnung gehen die Ergebnisse der Untersuchungen der DN900-Säulen (Reinwasser) in der Anlage des CLEWATEC ein (vgl. Kapitel 4.3.2).

Die Messergebnisse von

- den eingetragenen Luftmengen in sl/min,
- SOTR in kg O₂/h,
- SSOTE in %/m und
- SOTE in %

werden aus dem von CLEWATEC erzielten Messdaten entnommen (vgl. Kapitel 4.3.2).

Die Auswertung der Messdaten verdeutlicht, dass das Modul mit den MILA-Begaser in der eingesetzten Konfiguration mit 12 Begaserrohren energetisch vorteilhafter im Vergleich mit den eingesetzten zwei Tellerbelüftern ist. Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass bei niedrigen Luftmengen von 10 sl/min bis 20 sl/min die Leistungsunterschiede der beiden eingesetzten Belüftersysteme gering bis nicht messbar sind. Ab 30 sl/min werden die Unterschiede der Messwerte deutlicher. Der MILA-Begaser ist gekennzeichnet durch einen relativ konstanten Sauerstoffübergangseffizienz (SOTE) zwischen 29% und 32% im Bereich von 40 sl/min bis 100 sl/min.

Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Die Berechnungen erfolgen für einen Eintrag von 50 sl/min und für 70 sl/min in den Belebtschlamm. In jedes der Becken der halbtechnischen Anlage wurde eine gleiche Luftmenge eingetragen – der Eintrag der Luft erfolgte im Parallelbetrieb.

Um den energetischen Vorteil des MILA-Begasers in der Wirtschaftlichkeitsberechnung darzustellen wurde die in das Becken mit dem MILA-Begaser einzutragende Luftmenge mit dem Faktor SOTE (Tellerbelüfter)/SOTE (MILA-Begaser) ins Verhältnis zu der Luftmenge in die Säule mit den Tellerbelüfter gesetzt.

Mit diesen Luftmengen wurde der Energiebedarf gem. der Gleichung $\text{Druck in Pa} \cdot \text{Volumenstrom in m}^3/\text{s}$ berechnet. Weiter wurden die Investitionen mit dem jährlichen Abschreibungssatz sowie einem mittleren Zinssatz von 3% in die Berechnung eingestellt. Zur Ermittlung der CO₂-Umlage wurde die CO₂-Emission für Steinkohle mit 0,335 kg CO₂/kWh angesetzt [27].

Die Ergebnisse für den erforderlichen finanziellen Aufwand für eine kalkulatorische Betriebsdauer von 10 Jahren ergeben sich aus

- Investition in MILA-Begaser bzw. Tellerbelüfter in €
- Zinsen mit i. M. 5%
- 5500 Betriebsstunden p.a.
- Stromtarif von 30 €/kWh
- 50 €/kg CO₂
- Spez. Eintrag von 2 Nm³/m²*h

4.7.1.1 Wirtschaftlichkeitsanalyse mit den Messergebnissen der halbtechnischen Anlage

Für einen MILA-Begaser und für einen Tellerbelüfter wurde je ein spez. Stückpreis angesetzt, mit denen sich gleich hohe Kosten aus Investition und Kapitalkosten errechnen. Mit diesem Ansatz bleiben Investitionen und Kapitalkosten Anteil der Gesamtkosten, die Auswirkungen der unterschiedlichen Kosten für die Energie und die CO₂-Umlage werden so in ihren spezifischen Beträgen transparent.

Ergebnisse mit den Messergebnissen der halbtechnischen Anlage

Bei gleichen Investitionen und Kapitalkosten machen die Energiekosten den maßgeblichen Unterschied der Wirtschaftlichkeit von MILA-Begaser und Tellerbelüftern aus. Die CO₂-Umlage ist bei einem Betrag von 50 €/kg CO₂ zwar vorhanden, jedoch nicht entscheidungsrelevant. Bei den Luftmengen von 50 sl/min und 70 sl/min ergeben sich die Unterschiede der Kosten bei gleichen Kosten für Investition und Kapital vorrangig durch den Energiebedarf. Die Abbildung 45 – Abbildung 48 zeigen die berechneten Kosten und Abschätzungen für die zwei Durchflussraten.

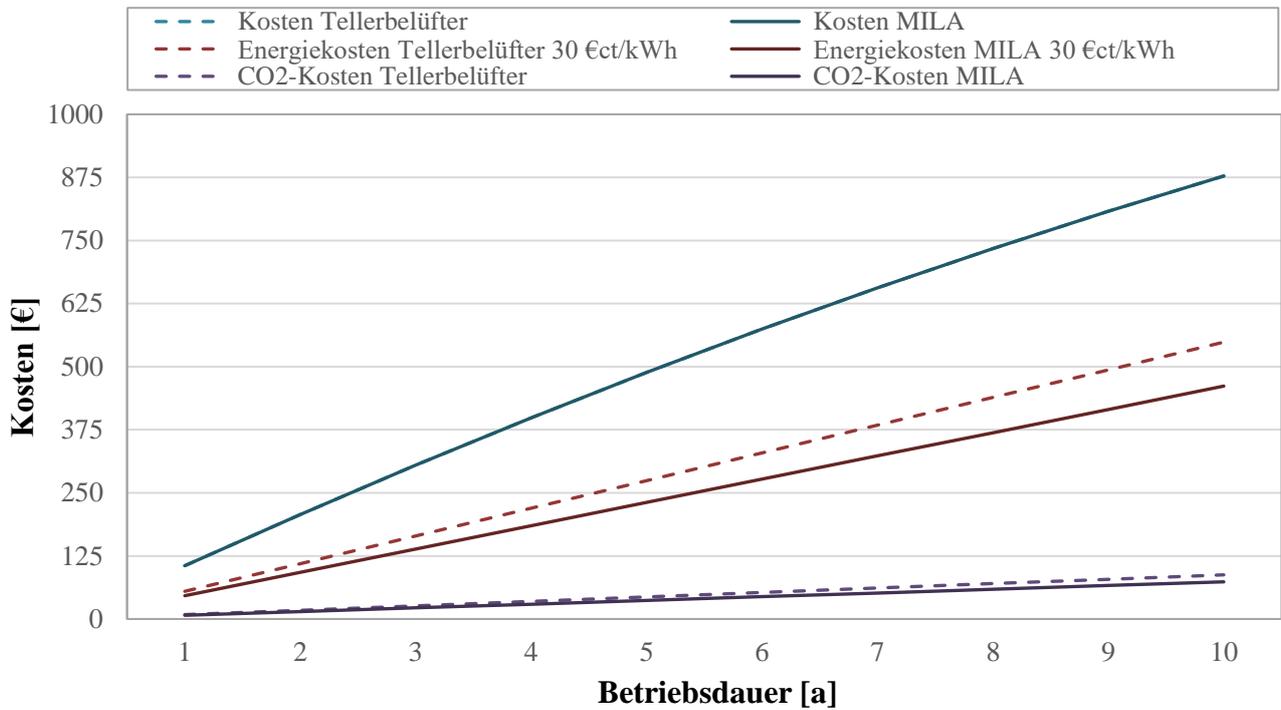


Abbildung 45: Gegenüberstellung der anteiligen Kosten für den MILA-Begaser mit denen für Tellerbelüfter für die kalkulatorische Nutzungsdauern bei 50 sl/min

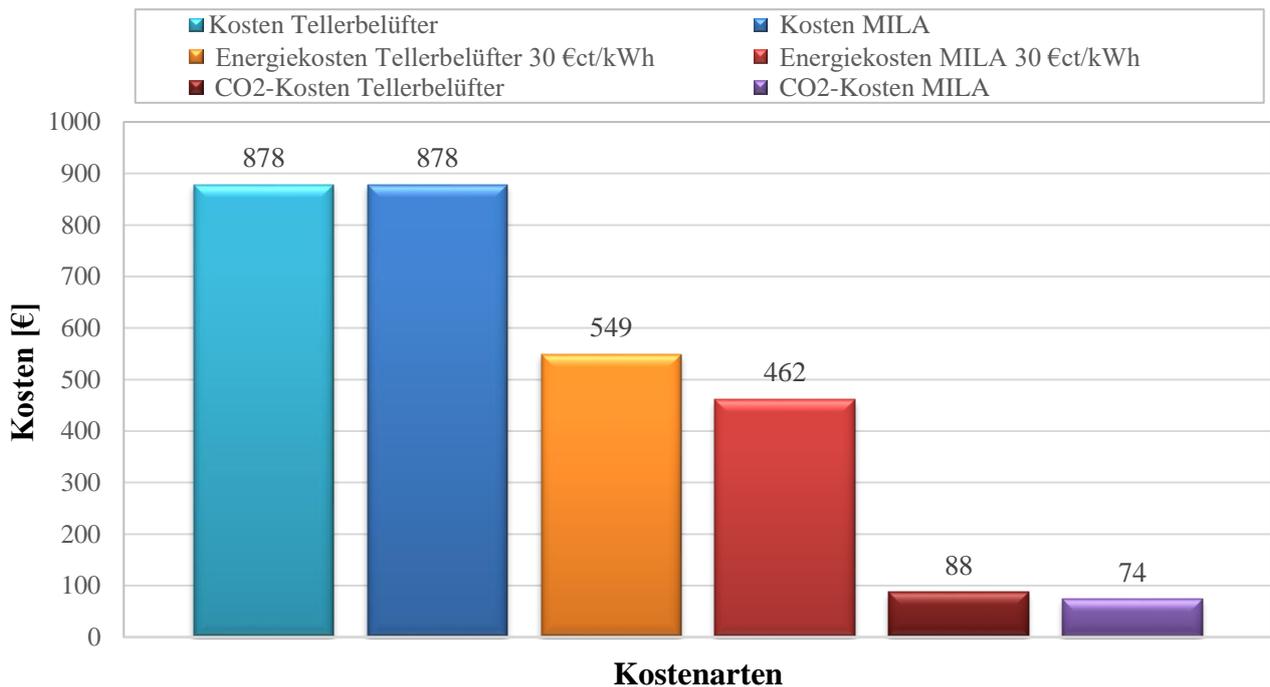


Abbildung 46: Gegenüberstellung der kumulierten Kosten für den MILA-Begaser mit denen für Tellerbelüfter bei 70 sl/min

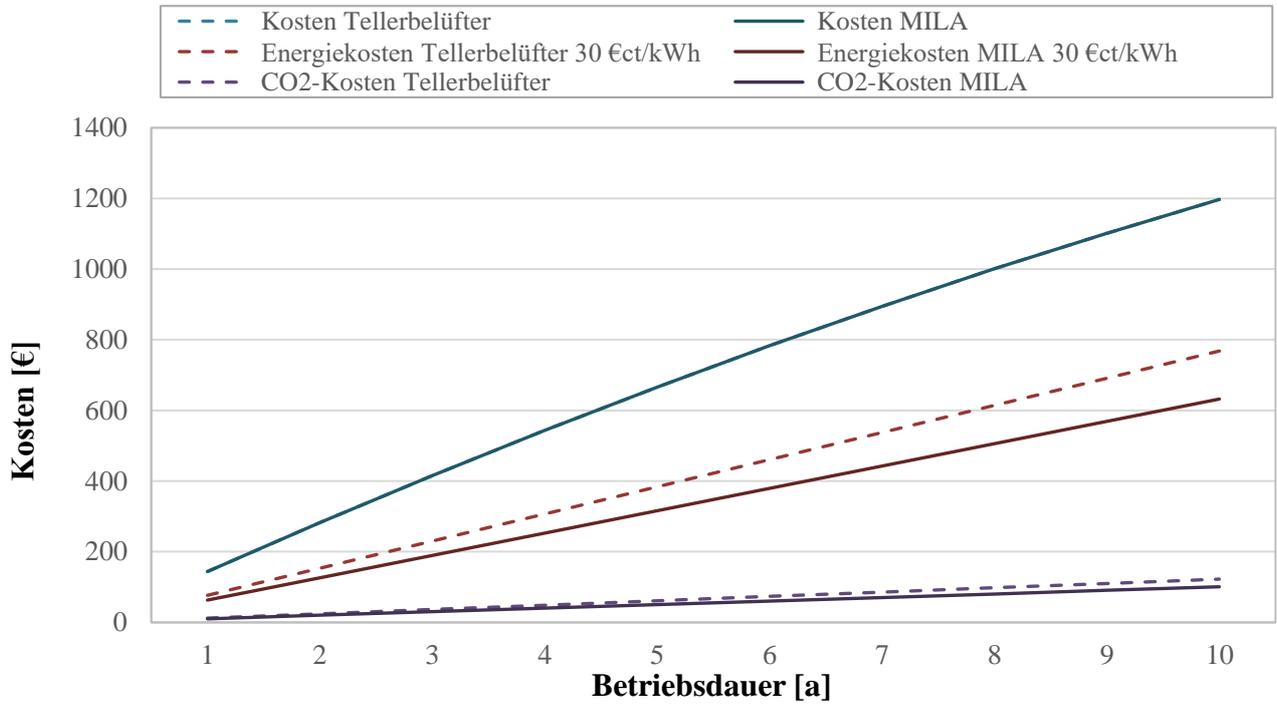


Abbildung 47: Gegenüberstellung der anteiligen Kosten für den MILA-Begaser mit denen für Tellerbelüfter für die kalkulatorische Nutzungsdauern bei 70 sl/min

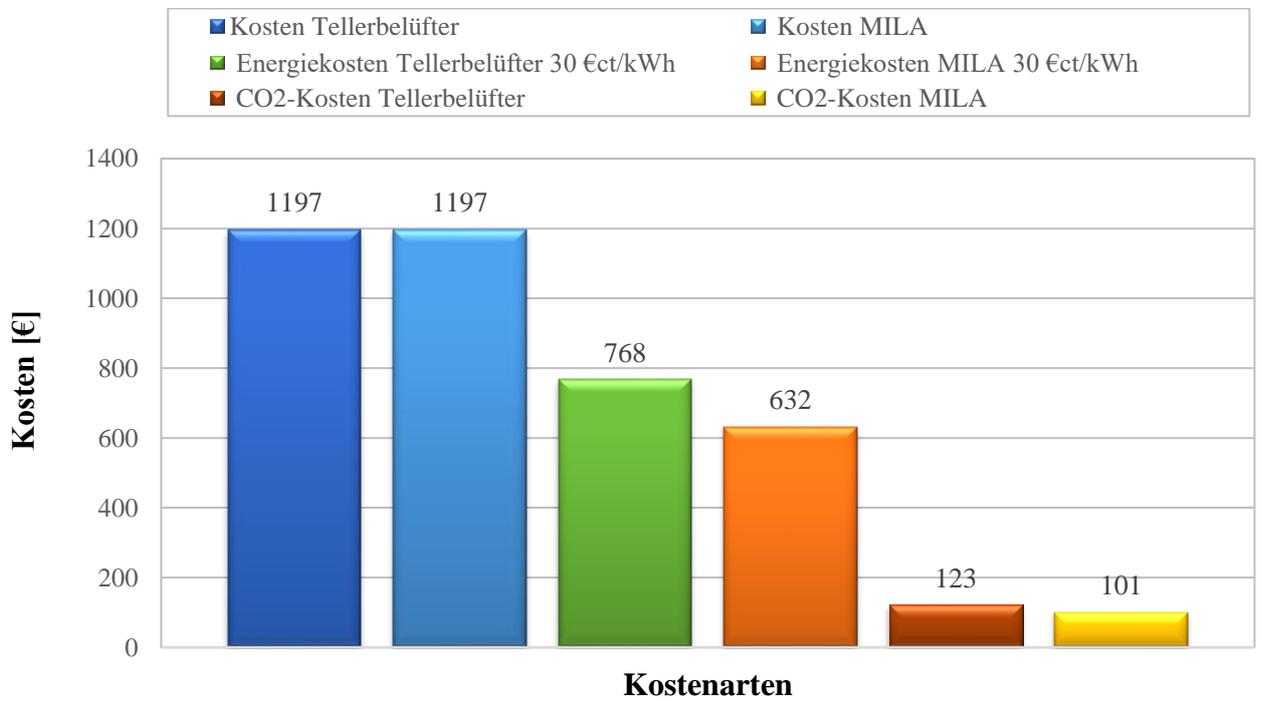


Abbildung 48: Gegenüberstellung der kumulierten Kosten für MILA-Begaser mit denen für Tellerbelüfter bei 70 sl/min

4.7.1.2 Modelrechnung mit den 1000-fachen Luftmengen

In einer Modellrechnung mit den 1000-fachen Luftmengen von 50000 sl/min sowie von 70000 sl/min wurde geprüft, inwieweit der Aufbau des Rechnungsschema für weitere Wirtschaftlichkeitsanalysen von Belüftern geeignet ist. Dieses Vorgehen wird als vertretbar angesehen, da sowohl mit den Berechnungen mit den Messdaten als auch mit den simulierten Daten ein gleicher Lufteintrag von $2 \text{ Nm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ angesetzt wird. Die Ergebnisse dieser Modellrechnung sind in den Abbildung 49 – Abbildung 52 dargestellt.

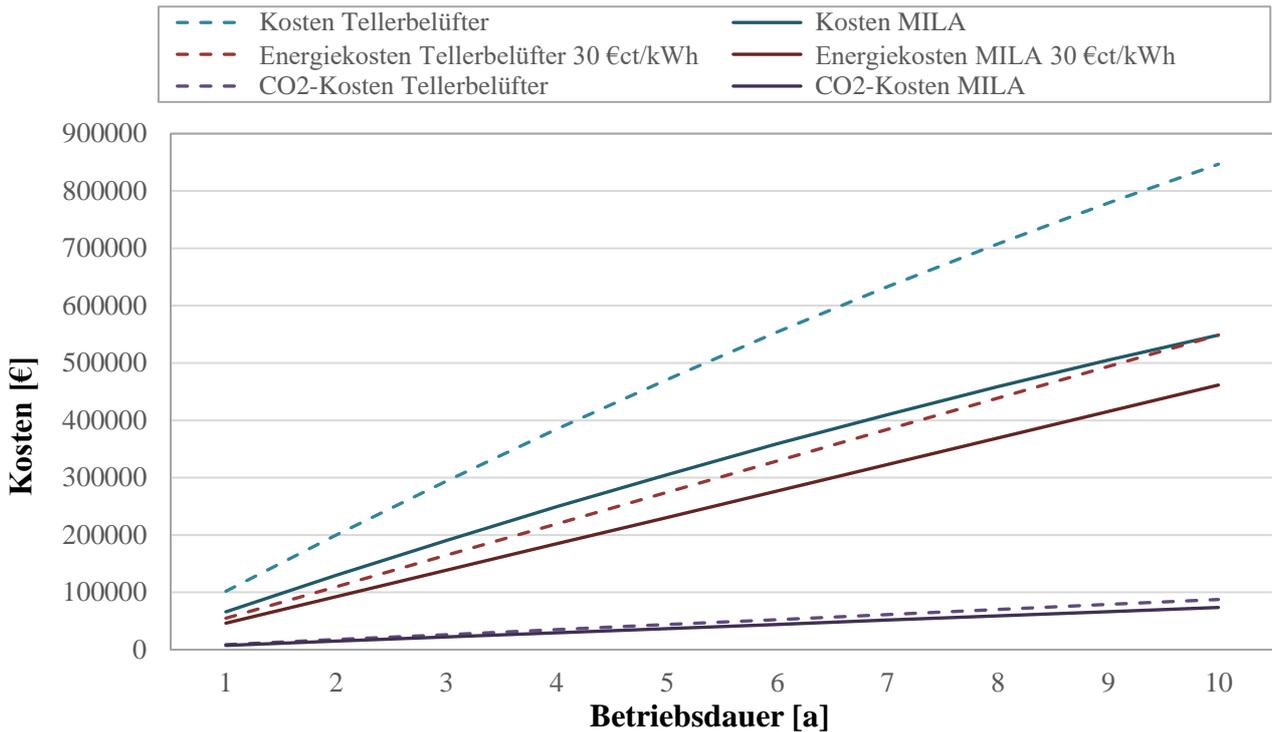


Abbildung 49: Gegenüberstellung der anteiligen Kosten für den MILA-Begaser mit denen für Tellerbelüfter für die kalkulatorische Nutzungsdauer bei 50000 sl/min

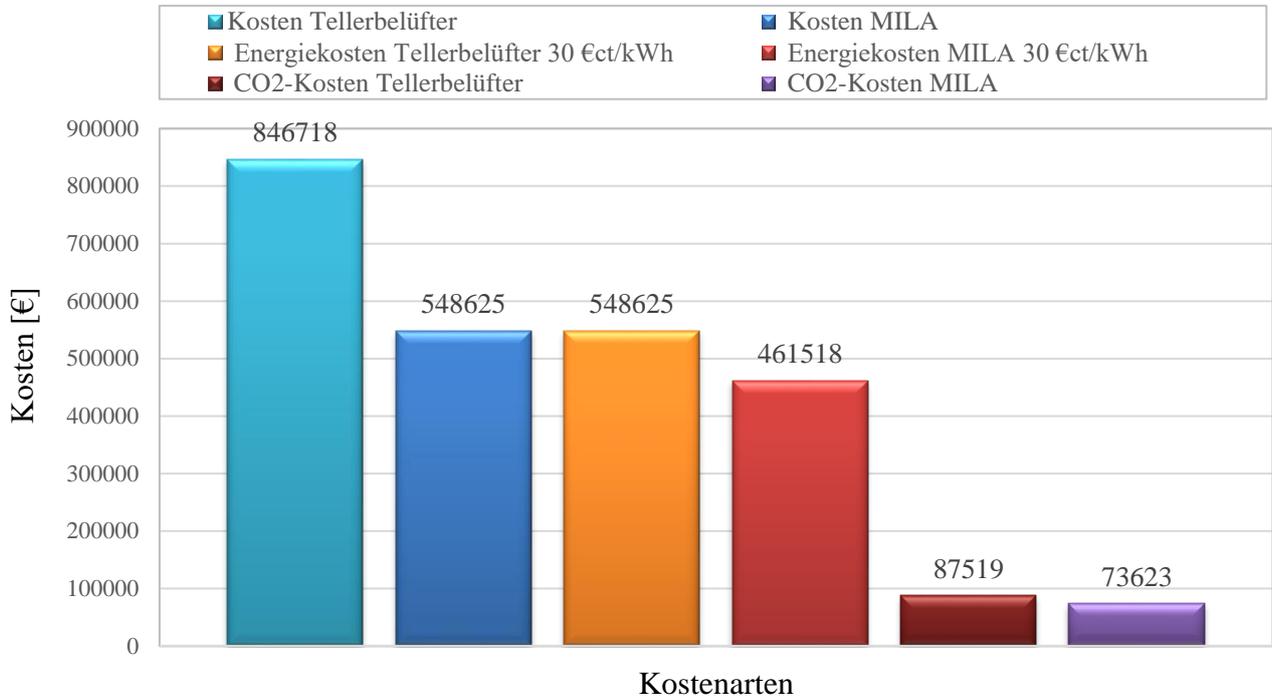


Abbildung 50: Gegenüberstellung der kumulierten Kosten für MILA-Begaser mit denen für Tellerbelüfter bei 50000 sl/min

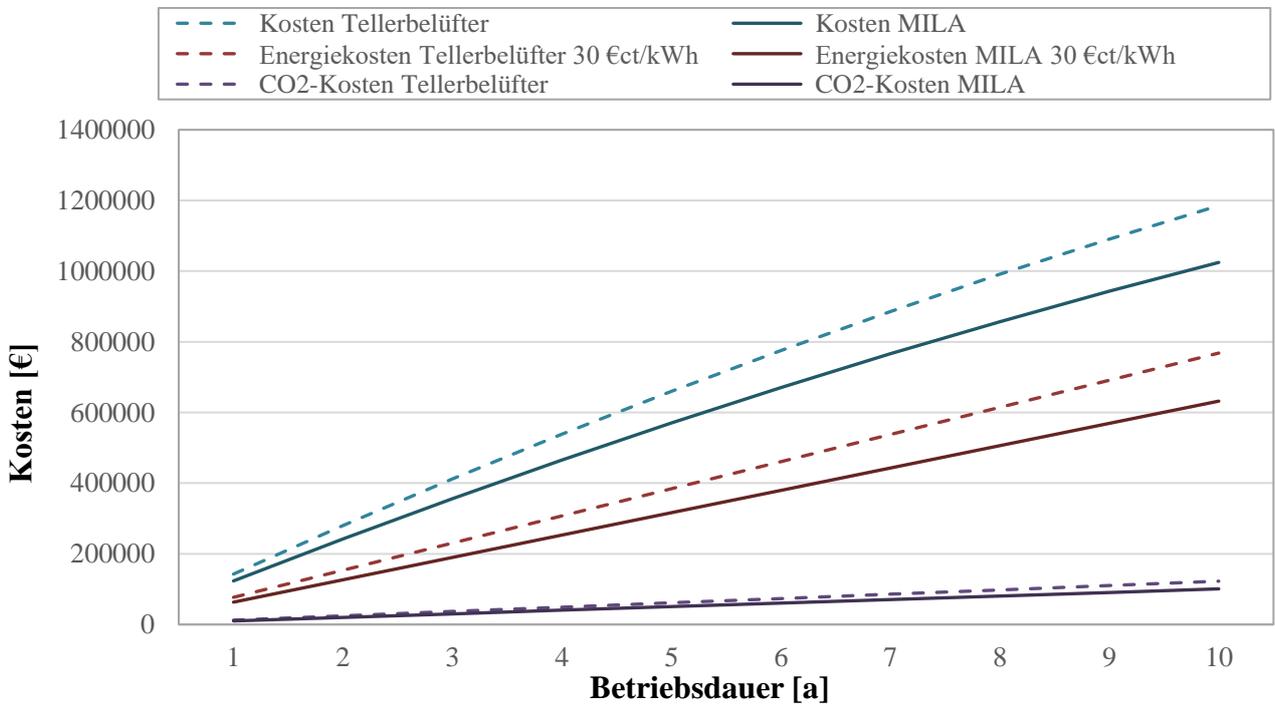


Abbildung 51: Gegenüberstellung der anteiligen Kosten für den MILA-Begaser mit denen für Tellerbelüfter für die kalkulatorische Nutzungsdauern bei 70000 sl/min

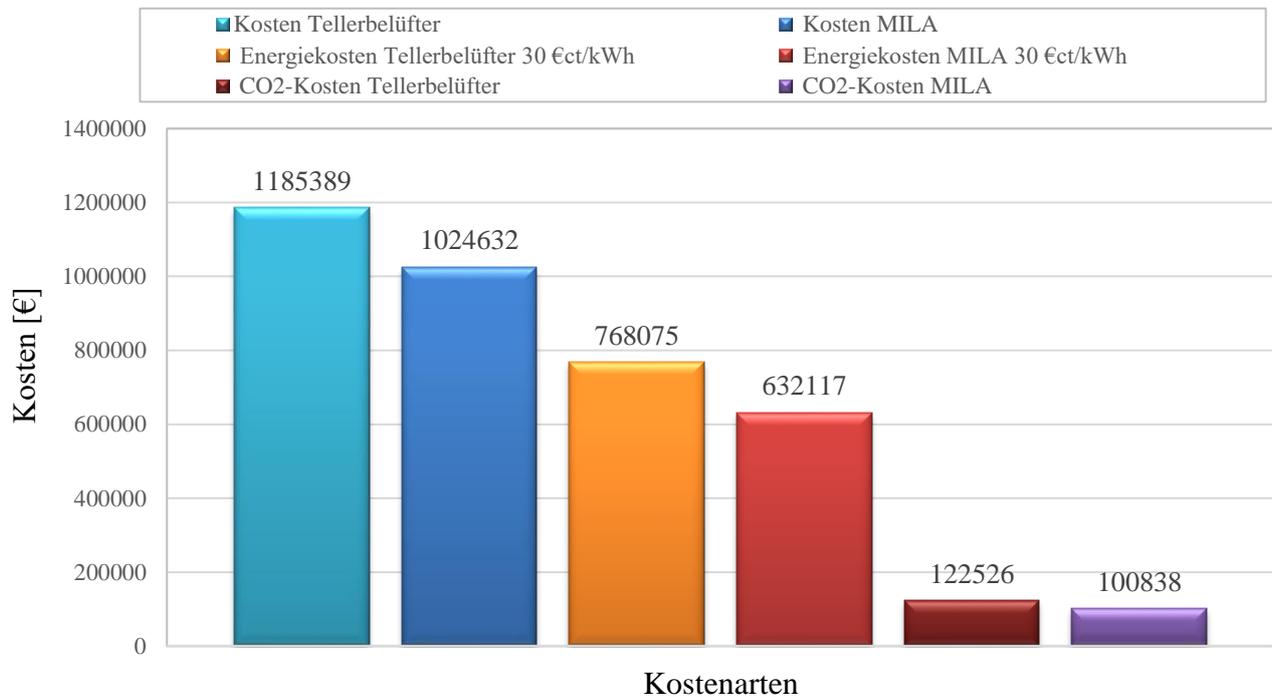


Abbildung 52: Gegenüberstellung der kumulierten Kosten für MILA-Begaser mit denen für Tellerbelüfter bei 70000 sl/min

Aus den Ergebnissen dieser Simulationsrechnungen wird ersichtlich, dass bei großen Luftmengen der Investitionsbedarf inkl. Kapitalkosten für den MILA-Begaser auf Grund des effizienteren Sauerstoffeintrags signifikant niedriger gegenüber dem Investitionsbedarf und den Kapitalkosten für Tellerbelüfter anzusetzen ist. Kosten für die Wartung und die Druckspülung konnten hier jedoch noch nicht berücksichtigt werden und müssen mit Daten aus längerer Betriebserfahrung im Pilotmaßstab abgesichert werden.

Energiebedarf nach DWA und nach Pöpel und Wagner

Zur Bewertung der Kosten für den Energieeintrag mit dem MILA-Begaser und mit Tellerbelüftern wurden weitere Methoden zur Berechnung der Kosten für die Belüftung von Belebtschlamm ausgewertet. Hierzu wurde die Methode nach DWA-M 229-2 sowie die von Pöpel und Wagner erarbeitete Methode herangezogen [27, 28]. Kennzeichnend für diese Methode ist – vereinfacht wiedergegeben - die Auswertung von Betriebsdaten von Kläranlagen. Diese Daten werden statistisch ausgewertet. Je nach Datenbasis ergeben sich somit verschiedene Ansätze und Verknüpfungen.

Der wesentliche Unterschied zwischen den Methoden nach DWA sowie Pöpel und Wagner zu dem Ansatz nach MILA ist, dass MILA in die Wirtschaftlichkeitsanalyse die Refinanzierung der Investition inkl. Kapitalkosten einbezieht.

Fazit der Wirtschaftlichkeitsanalyse

Als Folge dieses methodischen Ansatzes wird ersichtlich, dass nicht nur die niedrigere einzutragende Luftmenge maßgeblich für die Wirtschaftlichkeit eines Belüftungssystems ist, sondern bei signifikanten Unterschieden in der zu fördernden Luftmenge sich der unterschiedliche Investitionsbedarf inkl. der zugehörigen Kapitalkosten in gleichem Umfang oder auch darüber hinaus auf die Wirtschaftlichkeit der Belüftung auswirken.

Literaturverzeichnis

- [1] K. Fricke, „Energieeffizienz kommunaler Kläranlagen“, *Umweltbundesamt, Dessau.*, S. 10, 2009.
- [2] UM Baden Württemberg, „Leitfaden Energieeffizienz auf Kläranlagen“, Stuttgart, 2015.
- [3] A. Kumar, S. Moulick, und B. C. Mal, „Selection of aerators for intensive aquacultural pond“, *Aquac. Eng.*, Bd. 56, S. 71–78, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2013.05.003>.
- [4] Öko-Institut e.V., „Politik für eine nachhaltige Aquakultur 2050“, Freiburg, 2018. doi: [10.4126/FRL01-006411065](https://doi.org/10.4126/FRL01-006411065).
- [5] DBU, „Keine Energie ohne Wasser“, Clausthal-Zellerfeld, 2019.
- [6] R. Herrmann-Heber, S. F. Reinecke, und U. Hampel, „Dynamic aeration for improved oxygen mass transfer in the wastewater treatment process“, *Chem. Eng. J.*, Bd. 386, S. 122068, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122068>.
- [7] J. F. Muir, „Fuel and energy use in the fisheries sector“, Rome, 2015.
- [8] J. Drownowski, A. Remiszewska-Skwarek, S. Duda, und G. Łągód, „Aeration process in bioreactors as the main energy consumer in a wastewater treatment plant. Review of solutions and methods of process optimization“, *Processes*, Bd. 7, Nr. 5, 2019, doi: [10.3390/pr7050311](https://doi.org/10.3390/pr7050311).
- [9] X. Cheng, Y. Xie, D. Zhu, und J. Xie, „Modeling re-oxygenation performance of fine-bubble-diffusing aeration system in aquaculture ponds“, *Aquac. Int.*, Bd. 27, Nr. 5, S. 1353–1368, 2019, doi: [10.1007/s10499-019-00390-6](https://doi.org/10.1007/s10499-019-00390-6).
- [10] J. Behnisch, M. Schwarz, und M. Wagner, „Three decades of oxygen transfer tests in clean water in a pilot scale test tank with fine bubble diffusers and the resulting conclusions for WWTP operation“, *Water Pract. Technol.*, 2020, doi: <https://doi.org/10.2166/wpt.2020.072>.
- [11] S. Reinecke, A. K. Höffmann, U. Hampel, P. Ehrhard, und M. Stachowske, „Leistungsoptimierung von Kläranlagen durch gezielte Strömungsführung in Belebtschlammbecken - LEOBEL“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-30799-03.pdf>.
- [12] M. Motarjemi und G. J. Jameson, „Mass transfer from very small bubbles—the optimum bubble size for aeration“, *Chem. Eng. Sci.*, Bd. 33, Nr. 11, S. 1415–1423, 1978, doi: [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(78\)85190-2](https://doi.org/10.1016/0009-2509(78)85190-2).
- [13] A. Hasanen, P. Orivuori, und J. Aittamaa, „Measurements of local bubble size distributions from various flexible membrane diffusers“, *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, Bd. 45, Nr. 4, S. 291–302, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2005.09.003>.
- [14] E. Mohseni, R. Herrmann-Heber, S. F. Reinecke, und U. Hampel, „Bubble generation by micro-orifices with application on activated sludge wastewater treatment“, *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*, Bd. 143, Nr. April, S. 0–27, 2019, doi: [10.1016/j.cep.2019.04.011](https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.04.011).
- [15] W. Frey und C. Thonhauser, „Clogging and cleaning of fine-pore membrane diffusers“, *Water Sci. Technol.*, Bd. 50, Nr. 7, S. 69–77, 2004, doi: [10.2166/wst.2004.0419](https://doi.org/10.2166/wst.2004.0419).
- [16] R. Herrman-Heber, S. Kutschke, S. Reinecke, und U. Hampel, „Steigerung der Energieeffizienz bei der biologischen Abwasserreinigung durch den Einsatz von Kanülenbegasern mit dem Ziel eines nachhaltigen Gewässer- und Klimaschutzes - SEBAK“, 2018.
- [17] Mohseni, E.; Kalayathine, J.J.; Reinecke, S.F.; Hampel, U., Dynamics of Bubble Formation at Micro-orifices under Constant Gas Flow Conditions. *Int. J. Multiph. Flow* **2020**, *132*, 103407.
- [18] Ziegenhein, T., Fluid Dynamics of Bubbly Flows. Ph.D. Thesis, Technische Universität Berlin, Berlin, Germany, 2016.
- [19] Behnisch, J.; Ganzauge, A.; Sander, S.; Herrling, M.; Wagner, M. Improving aeration systems in saline water: Measurement of local bubble size and volumetric mass transfer coefficient of conventional membrane diffusers. *Water Sci. Technol.* 2018, *78*, 860–867

- [20] Herrmann-Heber, R.; Ristau, F.; Mohseni, E.; Reinecke, S.F.; Hampel, U. Experimental Oxygen Mass Transfer Study of Micro-Perforated Diffusers. *Energies* 2021, 14, 7268. <https://doi.org/10.3390/en14217268>
- [21] DWA-Merkblatt, M. 229-1. Systeme zur Belüftung und Durchmischung von Belebungsanlagen, Teil 1: Planung, Ausschreibung und Ausführung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. 2007.
- [22] Behnisch, J.; Schwarz, M.; Wagner, M. Three decades of oxygen transfer tests in clean water in a pilot scale test tank with fine-bubble diffusers and the resulting conclusions for WWTP operation. *Water Pract. Technol.* 2020, 15, 910–920.
- [23] DWA-Merkblatt, M. 209. Messung der Sauerstoffzufuhr von Belüftungseinrichtungen in Belebungsanlagen in Reinwasser und in belebtem Schlamm. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. 2007.
- [24] DIN EN ISO 5814:2013-02. Wasserbeschaffenheit - Bestimmung des gelösten Sauerstoffs - Elektrochemisches Verfahren. (ISO 5814:2012); Deutsche Fassung EN ISO 5814:2012.
- [25] DAA Technikum. Grundlagen zur Auswertung u. Interpretation von Messwerten kennen und anwenden. DAA-Technikum Gemeinnützige Fernunterrichts-GmbH. Essen.
- [26] Informationsblatt CO₂-Faktoren Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft – Zuschuss. BMWK.2024.
- [27] DWA-M 229-2 - Systeme zur Belüftung und Durchmischung von Belebungsanlagen - Teil 2: Betrieb - September 2017
- [28] PÖPEL, H. J. und WAGNER, M.: Sauerstoffeintrag und Sauerstofftrag moderner Belüftungssysteme. Teil 1: Druckluftbelüftung. *Korrespondenz Abwasser* 36 (1989), S. 453 -457