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

# STEIGERUNG DER ENERGIEEFFIZIENZ BEI DER BIOLOGISCHEN ABWASSERREINIGUNG DURCH DEN EINSATZ VON KANÜLENBEGASERN MIT DEM ZIEL EINES NACHHALTIGEN GEWÄSSER- UND KLIMASCHUTZES (SEBAK)

R. Herrmann-Heber, S. Kutschke, S. Reinecke, U. Hampel

Gefördert durch

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

KURZBERICHT

HZDR

HELMHOLTZ
ZENTRUM DRESDEN
ROSSENDORF

| 1. Berichtsart<br>Kurzbericht | |
|---|---|
| 2. Titel<br>Steigerung der Energieeffizienz bei der biologischen Abwasserreinigung durch den Einsatz von Kanülenbegasern mit dem Ziel eines nachhaltigen Gewässer- und Klimaschutzes (SEBAK) | |
| 3. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]<br>Herrmann-Heber, Robert<br>Kutschke, Sabine<br>Reinecke, Sebastian<br>Hampel, Uwe | 4. Abschlussdatum des Vorhabens<br>28.02.2018<br>5. Förderkennzeichen<br>17-04.02.01-9a/2014 |
| 6. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)<br>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR)<br>Institut für Fluiddynamik<br>Abteilung für experimentelle Thermofluiddynamik<br>Postfach 510119<br>01314 Dresden | |
| 7. Fördernde Institution (Name, Adresse)<br>Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen | |

8. Kurzfassung

Ziel des Projektes war die Evaluierung von Belüftern mit starren Lochöffnungen im Mikrometerbereich in Bezug auf ihren effizienten Sauerstoffeintrag in Belebungsbecken der biologischen Abwasserreinigung. Ausgehend von einem auf Kanülen basierenden Begaserkonzept wurden die initialen Gasblasengrößenverteilungen von Einzelkanülen und Lochplatten (Dicke < 500 µm) aus Edelstahl untersucht. Dabei haben Kanülen gegenüber Lochplatten keinen signifikanten hydrodynamischen Vorteil gezeigt. Darauf aufbauend wurde ein auf mikroperforierten Lochplatten basierendes Edelstahlbelüfterkonzept entwickelt und im Technikum untersucht.

In Untersuchungen nach der Absorptionsmethode wurden für Edelstahlbelüfter mit 30, 50 und 70 µm sowie konventionelle Teller-, Rohr- und Plattenmembranbelüfter die Sauerstoffzufuhr, der Druckverlust und der Sauerstoffertrag bestimmt. Als Versuchsmedien wurden Reinstwasser, salzhaltiges Wasser und Belebtschlamm aus einer Kläranlage verwendet. In Reinstwasser konnten die Edelstahlbelüfter sehr hohe *SSOTR*-Werte und die höchsten Sauerstofferträge trotz höherem Druckverlust im Vergleich zu Standardmembranbelüftern erreichen. Dabei erzielten die Edelstahlbelüfter mit 70 µm großen Lochöffnungen die besten Ergebnisse, welche auch in salzhaltigem Wasser und Belebtschlamm bestätigt wurden. Eine Reduktion des Druckverlustes und damit eine weitere Steigerung des *SAE* für vergleichbare Gasmassenströme ist durch eine angepasste Auslegung des Belüftungssystems mit einem höheren Materialaufwand gegenüber konventionellen Belüftern erreichbar. Im Sauerstoffertrag in Belebtschlamm bezogen auf die Belüfterfläche war eine Steigerung von bis zu 20 % gegenüber dem besten Standardbelüfter messbar. Bei Untersuchungen zur Reinigungseffizienz wurde Belebtschlamm mit verschiedenen Belüftern vollständig nitrifiziert und der Luft- bzw. Energiebedarf ermittelt. Auch hierbei konnten die Edelstahlbelüfter mit 70 µm Lochöffnungen einen Vorteil von mindestens 13 % gegenüber Standardbelüftern erzielen.

Basierend auf der Verringerung des hydrostatischen Druckes wurden Sauerstoffzufuhrmessungen mit geringerer Einblastiefe durchgeführt. Mit drei über der Höhe der Technikumsanlage verteilten Sauerstoffsensoren wurde dabei eine Verringerung der Sauerstoffzufuhr in den Bereichen unter den Belüftern festgestellt, die insgesamt zu einer Minderung der mittleren Sauerstoffzufuhr in der Anlage führte. Trotz geringerem hydrostatischen Druck sank daher der Sauerstoffertrag. Zudem wurde bei verringerter Einblastiefe und Experimenten mit Belebtschlamm Schlammsedimentation beobachtet, sodass der Betrieb mit geringeren Einblastiefen und einer unbelüfteten Zone unter den Belüftern als energetisch nicht sinnvoll betrachtet wird.

Anhand der Steigerung der Reinigungsleistung und des Sauerstoffertrages wurde eine Wirtschaftlichkeitsanalyse der Edelstahlbelüfter mit 70 µm Lochöffnungen durchgeführt. Als Grundlage dienten Verbrauchswerte einer typischen Kläranlage der Größenklasse 4. Je nach Betrachtungsweise konnten Amortisationszeiten im Bereich von 1,1 Jahren bis 2,6 Jahren berechnet werden. Die fertigungs- und bauformbedingten hohen Investitionskosten der Edelstahlbelüfter sorgen hier im Vergleich zu derzeit kommerziell erhältlichen Membranbelüftern für längere Amortisationszeiten, die durch Designoptimierungen der Edelstahlbelüfter weiter reduziert werden können. Für einen Praxiseinsatz der Belüfter ist ein Langzeittest erforderlich, um auch Effekte wie Fouling und Clogging zu untersuchen. Ein weiteres Einsatzgebiet ergibt sich aufgrund des besseren Einblasverhaltens auch im Bereich der nachgeschalteten 4. Reinigungsstufe als Ozondiffusor, worüber es aber noch keine Erkenntnisse gibt.

# Inhalt


1 Einleitung ..... 1

2 Stand von Wissenschaft und Technik ..... 3
2.1 Belüfter mit Mikrometeröffnungen ..... 3
2.2 Bestimmung und Bewertung des Sauerstoffeintrages ..... 4
2.2.1 Grundlagen der Absorptionsmethode ..... 4
2.2.2 Parameter zur Beschreibung des Sauerstoffeintrages ..... 6
2.2.3 Einflüsse auf die Sauerstoffzufuhr ..... 8
2.3 Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Belüftungssystemen ..... 8

3 Material und Methoden ..... 11
3.1 Untersuchung von Einzelblasen und deren Initialverteilung ..... 11
3.2 Verwendete Kanülen und Lochplatten ..... 12
3.3 Experimente im Technikumsmaßstab ..... 15
3.3.1 Versuchsaufbau der Technikumsanlage ..... 15
3.3.2 Auswahl der Belüfter und Betriebsbedingungen ..... 17
3.3.3 Auswertung der Absorptionsversuche ..... 18
3.3.4 Durchführung der Reinigungseffizienzversuche ..... 19
3.3.5 Bestimmung der Reinigungseffizienz mit belebtem Schlamm ..... 20

4 Ergebnisse und Auswertung ..... 21
4.1 Videometrieuntersuchungen von Einzelblasen ..... 21
4.2 Sauerststoffeintrag ..... 22
4.2.1 Sauerstoffeintrag in Reinstwasser ..... 22
4.2.2 Sauerstoffeintrag in salzhaltiges Wasser ..... 25
4.2.3 Sauerstoffeintrag in Belebtschlamm ..... 27
4.3 Variation der Einblastiefe ..... 30
4.3.1 Effekt der Einblastiefe in Reinstwasser ..... 30
4.3.2 Effekt der Einblastiefe in Belebtschlamm ..... 31
4.4 Reinigungsleistung in belebtem Schlamm ..... 33

5 Energetische und wirtschaftliche Bilanzierung ..... 36
5.1 Energieersparnisanalyse ..... 37
5.2 Wirtschaftlichkeitsanalyse ..... 38

6 Zusammenfassung und Ausblick ..... 40

7 Literaturverzeichnis ..... 42

## Abkürzungsverzeichnis

| Symbol | Einheit | Beschreibung |
|---|---|---|
| a | $m^2$ | Spezifische Grenzfläche |
| $A_{BB}$ | $m^2$ | Grundfläche des Belebungsbecken |
| $A_{Bel}$ | $m^2$ | aktive Abgasfläche von Belüftungselementen |
| $A_G$ | $m^2$ | Grenzfläche |
| $A_{ges}$ | $m^2$ | Gesamte Stoffaustauschfläche (Wasser und Blasen) |
| $B_D$ | $m^2/m^2$, % | Belegungsdichte |
| $C_0$ | mg $O_2$/l | Konzentration an gelöstem Sauerstoff zum Zeitpunkt t = 0 |
| $C_S$ | mg $O_2$/l | Konzentration an gelöstem Sauerstoff in der Flüssigphase |
| $C_{S,20}$ | mg $O_2$/l | Normierte Versuchs-Sauerstoffsättigungswert in Reinwasser (T = 20 °C, p = 1013 hPa) |
| $C_{S,p^*,T}$ | mg $O_2$/l | Temperaturabhängiger Versuchs-Sauerstoffsättigungswert in Reinwasser |
| $C_{S,St,20}$ | mg $O_2$/l | Normierter Standard-Sauerstoffsättigungswert (T = 20 °C, p = 1013 hPa) |
| $C_{S,St,T}$ | mg $O_2$/l | Temperaturabhängiger Standard-Sauerstoffsättigungswert |
| $C_T$ | mg $O_2$/l | Konzentration an gelöstem Sauerstoff zum Zeitpunkt t |
| $C_x$ | mg $O_2$/l | Soll-Sauerstoffkonzentration im Becken |
| $d_B$ | mm | Blasendurchmesser |
| dC/dx | $g/m^3m$ | Konzentrationsgradient |
| $E_0$ | $Wh/(m^3_Nm)$ | Verdichterkoeffizient |
| E | $Wh/m^3$ | Spezifischer Energiebedarf des Verdichters |
| $E_{Bel}$ | kWh/a | Strombedarf der Belüfter im Belebungsbecken |
| $e_{Bel,OV}$ | kWh/kg $O_2$ | spezifische Energieeffizienz der Belüftung |
| $e_E$ | kWh/Ea | spezifischer Energiebedarf der Belüftung |
| $E_G$ | - | Gasgehalt |
| $E_H$ | kJ | Energiebedarf |
| $EW_{CSB}$ | g/Ed | Einwohnerwert bezogen auf den CSB |
| g | $m/s^2$ | Gravitationsbeschleunigung |
| $h_D$ | m | Einblastiefe (Wasserhöhe über den Austrittsöffnungen der Belüftungselemente) |
| $H_D$ | $m_{WS}$ | Druckverlust |

| | | |
|---|---|---|
| $k_L$ | m/s | Stoffaustauschkoeffizient in der flüssigen Phase |
| $k_L$ | m/h | Stoffaustauschskoeffizient in der flüssigen Phase |
| $k_La$ | $h^{-1}$ | Belüftungskoeffizient |
| $k_La_{20}$ | $h^{-1}$ | Normierter Belüftungskoeffizient für Reinwasser (T = 20 °C) |
| $k_La_T$ | $h^{-1}$ | Temperaturabhängiger Belüftungskoeffizient für Reinwasser |
| $m_G$ | g | Gasmasse |
| $n_{Bel}$ | - | Anzahl der Belüftungselemente |
| $OV_{h,aM}$ | kg/h | Mittlerer stündlicher Sauerstoffverbrauch im Jahresmittel |
| $OV_R$ | mg/m³h | Sauerstoffverbrauch des belebten Schlamms |
| P | Wh/m³ | Belüfterleistung |
| $\Delta p$ | mbar | Druckverlust am Belüfter |
| p* | hPa | Atmosphärischer Luftdruck |
| $p_G$ | hPa | Partialdruck in der Gasphase |
| $p_h$ | hPa | hydrostatischer Druck |
| $p_r$ | mbar | Gemessener Relativdruck |
| $Q_{L,St}$ | $m^3_N/h$ | Normierter Luftvolumenstrom (T = 25 °C, p = 1013 hPa) |
| SAE | kg $O_2$/kWh | Standard-Sauerstoffertrag für Reinwasser |
| | | (T = 20 °C, p = 1013 hPa, $C_S$ = 0 mg/l) |
| $SAE_{Bel}$ | kg $O_2$/kWh | Standard-Sauerstoffertrag pro Abgasfläche für Reinwasser |
| | ·m² | (T = 20 °C, p = 1013 hPa, $C_S$ = 0 mg/l) |
| SOTR | kg $O_2$/h | Standard-Sauerstoffzufuhr für Reinwasser |
| | | (T = 20 °C, p = 1013 hPa, $C_S$ = 0 mg/l) |
| SSOTE | %/m | Spezifische Standard-Sauerstoffausnutzung für Reinwasser |
| | | (T = 20 °C, p = 1013 hPa, $C_S$ = 0 mg/l) |
| SSOTR | g $O_2$/m³m | Spezifische Sauerstoffzufuhr für Reinwasser |
| | | (T = 20 °C, p = 1013 hPa, $C_S$ = 0 mg/l) |
| t | s | Versuchsdauer |
| $t_D$ | s | Diffusionszeit |
| $t_K$ | s | Existenzzeit der Grenzfläche |
| $T_W$ | °C | Versuchstemperatur im Wasser |
| $v_B$ | m/s | Blasenaufstiegsgeschwindigkeit |
| $V_G$ | m³ | Gesamte Wasservolumen im begastem Zustand |
| $V_{Ges}$ | m³ | Gesamte Wasservolumen im unbegastem Zustand |
| $V_{Luft}$ | m³ | Eingebrachtes Luftvolumen |

| | | |
|---|---|---|
| x | m | Abstand von der Grenzfläche $A_G$ |
| α | - | Grenzflächenfaktor |
| $\alpha k_L a_{20}$ | $h^{-1}$ | Belüftungskoeffizient für belebten Schlamm (T = 20 °C) |
| $\alpha k_L a_T$ | $h^{-1}$ | Temperaturabhäniger Belüftungskoeffizient für belebten Schlamm |
| αSAE | kg $O_2$/kWh | Standard-Sauerstoffertrag für belebten Schlamm (T = 20 °C, p = 1013 hPa. $C_S$ = 0 mg/l) |
| αSOTR | kg $O_2$/h | Standard-Sauerstoffzufuhr für belebten Schlamm (T = 20 °C, p = 1013 hPa, $C_S$ = 0 mg/l) |
| αSSOTE | %/m | Spezifische Standard-Sauerstoffausnutzung für belebten Schlamm (T = 20 °C, p = 1013 hPa, $C_S$ = 0 mg/l) |
| αSSOTR | g $O_2$/m³m | Spezifische Sauerstoffzufuhr für belebten Schlamm (T = 20 °C, p = 1013 hPa, $C_S$ = 0 mg/l) |
| $\beta C_{S,p^*,T}$ | mg $O_2$/l | Temperaturabhängiger Versuchs-Sauerstoffsättigungswert in belebtem Schlamm |
| $\Delta F_i$ | % | Prozentuale Fehleranteil der Größe i |
| $\Delta f_i$ | spezifisch | Gesamtfehler der Größe i |
| $\Delta x_j$ | spezifisch | Größtfehler |
| $\rho_{Luft}$ | kg/m³ | Dichte von Luft |
| $\rho_{O2}$ | kg/m³ | Dichte von Sauerstoff |
| $\rho_W$ | kg/m³ | Dichte von Wasser |
| $\sigma_{j,M}$ | % | Prozentualer Anteil der Standardabweichung vom Mittelwert |
| $\sigma_{j,S}$ | % | Prozentualer Anteil der Standardabweichung der Sensoren |

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Kanülenbegaser im Betrieb (a), Gießharz-Kanülenbegaser (b) und Edelstahlbelüfter (c). ..... 4
Abbildung 2.2: Sauerstoffkonzentrationsverlauf für die Absorptionsmethode in Wasser (DWA-M 209, 2007) ..... 5
Abbildung 2.3: Sauerstoff-Konzentrationsverlauf für die Absorptionsmethode in Belebtschlamm (DWA-M 209, 2007) ..... 5
Abbildung 3.1: Videometrieversuchsstand mit Hochgeschwindigkeitskamera, LED-Lichtquelle und Strömungskanal. ..... 12
Abbildung 3.2: Mikroskopaufnahmen der Kanülenspitzen mit Innendurchmessern von 90 bis 200 µm und Schliffen von 30 bis 90°. ..... 12
Abbildung 3.3: Lochplatten mit unterschiedlichen Lochabständen. Lochöffnungen durch grüne Kreise markiert. ..... 13
Abbildung 3.4 Schematische Darstellung der Blasensäulen. ..... 16
Abbildung 3.5: Anordnung der Belüfter in den Blasensäulen (a) einzelner Tellerbelüfter, (b) zwei Tellerbelüfter, (c) Rohrbelüfter und (d) Plattenbelüfter ..... 18
Abbildung 3.6: Edelstahlbelüfter Anordnung Variante 1 (a), Edelstahlbelüfter Anordnung Variante 2 (b), Edelstahlbelüfter Anordnung Variante 3 (c). ..... 18
Abbildung 4.1: Vergleich der Sauterdurchmesser und des Druckverlustes bei Blasenbildung mit Kanülen, Einzellöchern und Lochplatten (5 mm Lochabstand) in Abhängigkeit vom Lochdurchmesser für einen Gasvolumenstrom von 10 sml/min pro Öffnung. ..... 21
Abbildung 4.2: Gegenüberstellung des Sauerstoffertrages der effektivsten ..... 23
Abbildung 4.3: Gegenüberstellung der Spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr der in Abhängigkeit des Sauerstoffertrages effektivsten Belüftungselemente. ..... 24
Abbildung 4.4: Gegenüberstellung des Verlaufes der Spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr der Edelstahlbelüfter EB3 mit Variation der Anordnung. ..... 25
Abbildung 4.4: Gegenüberstellung der spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr der Belüfter im entionisiertem und salzversetztem Wasser mit $CNa2SO4 = 0{,}5\ g/l$. ..... 25
Abbildung 4.5: Gegenüberstellung des Sauerstoffertrages der Belüftungselemente im entionisiertem und salzversetztem Wasser mit $CNa2SO4 = 0{,}5\ g/l$. ..... 26
Abbildung 4.6 Gegenüberstellung des Druckverlustes der Belüftungselemente im entionisiertem und salzversetztem Wasser mit $CNa2SO4 = 0{,}5\ g/l$ ..... 27
Abbildung 4.7: Edelstahlbelüfter auf Schlitten nach komplettem Durchlauf der Sauerstoffeintragsversuche. ..... 27
Abbildung 4.8: Vergleich der Standard-Sauerstoffzufuhr in Reinstwasser und Belebtschlamm für ausgewählte Belüfter. ..... 28
Abbildung 4.9: Vergleich des Druckverlustes von Edelstahl- und Standardbelüftern in Reinstwasser und Belebtschlamm in Abhängigkeit vom Gasmassestrom. ..... 29
Abbildung 4.10: Vergleich des Sauerstoffertrags von Edelstahl- und Membranbelüftern in Reinstwasser und Belebtschlamm in Abhängigkeit vom Gasmassestrom. ..... 30
Abbildung 4.11: Verlauf der Spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr in Abhängigkeit der Einblastiefe bei 2 $m^3_N/h$. ..... 31
Abbildung 4.12: Verlauf des Sauerstoffertrages in Abhängigkeit der Einblastiefe bei 2 $m^3_N/h$. ..... 31
Abbildung 4.13 Spezifische Standardsauerstoffzufuhr bei 2,8 m Einblastiefe im Vergleich zwischen Belüftern in Reinstwasser und Belebtschlamm. ..... 32
Abbildung 4.14: Standardsauerstoffertrag bei 2,8 m Einblastiefe im Vergleich zwischen Belüftern in Reinstwasser und Belebtschlamm. ..... 32
Abbildung 4.15: Konzentrationsverlauf von Ammonium und Nitrat bei einem Abbauversuch in der Technikumsanlage. ..... 33
Abbildung 4.16: Vergleich der Reinigungsleistung bezogen auf die Belüfterfläche in Belebtschlamm für verschiedene Belüfter. ..... 34
Abbildung 4.17: Vergleich der Reinigungsleistung bei Regelzielen zwischen 1 und 2 mg/l Sauerstoffgehalt in Belebtschlamm für eine Belüfterauswahl. ..... 35

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Abmaße der verwendeten Kanülen. ..... 13
Tabelle 3.2: Spezifikationen der verwendeten Lochplatten (ep: elektropoliert, up: unpoliert). .. 14
Tabelle 3.3: Sensoren an der Versuchsanlage für das SEBAK-Projekt ..... 16
Tabelle 3.4 Übersicht der Belüfterkenndaten ..... 17
Tabelle 3.5: Versuche für die Bestimmung der Reinigungseffizienz mit Belebtschlamm. Zusammenstellung der verwendeten Belüfter ..... 19
Tabelle 5.1: Zusammenstellung der Belüfter für die Wirtschaftlichkeitsanalyse mit deren Steigerung in $SAE_{Bel}$ und Reinigungsleistung. ..... 36
Tabelle 5.2: Energieverbrauch und Einsparungen anhand der $SAE_{Bel}$-Verbesserung im Vergleich zum Plattenbelüfter 1. ..... 37
Tabelle 5.3: Energieverbrauch und Einsparungen anhand der Reinigungsleistungsverbesserung im Vergleich zum Plattenbelüfter 1. ..... 38
Tabelle 5.4: Amortisationszeiten für verschiedene Belüfter. Berechnet nach $SAE_{Bel}$- bzw. Reinigungsleistungsverbesserung. ..... 39

# 1 Einleitung

Die Abwasserreinigung in Deutschland gehört zu den größten kommunalen Energieverbrauchern. Der Gesamtstromverbrauch der 10.000 Kläranlagen in Deutschland liegt bei etwa 4.440 GWh pro Jahr (Fricke, 2009). Die über 600 kommunalen Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen sind dabei für einen Anteil von über 1.000 GWh/a verantwortlich (MKULNV, 2014). Im Zuge der Energiewende und der Umstellung auf erneuerbare Energie ist es erforderlich den Energiebedarf der Kläranlage zu reduzieren. Verantwortlich für den hohen Energiebedarf sind die einzelnen Reinigungsstufen, die das Abwasser reinigen. Der energieintensivste Prozessschritt ist die biologische Abwasserreinigung, auf die bis zu 80 % des Energiebedarfs entfallen (Wagner, 2002). Die biologische Reinigung besteht in der Regel aus einer Nitrifikations- und einer Denitrifikationsstufe, um Stickstoffverbindungen durch biologische Abbauprozesse aus dem Abwasser zu entfernen. Die beiden Prozesse werden im kommunalen Bereich oft in 4 bis 6 m tiefen Becken durchgeführt. Bei der Nitrifikation werden die stickstoffhaltigen Ammonium-Verbindungen durch Mikroorganismen oxidiert. Der benötigte Sauerstoff wird durch Gebläse und Belüfter in Belebungsbecken eingetragen. Darin liegt die Ursache für den hohen Energiebedarf. Der hydrostatische Druck in den Becken und der Druckverlust durch Rohrleitungen und Belüfter müssen überwunden werden. Aus den Belüftern steigt die Luft in Form feiner Luftblasen auf. Damit die Mikroorganismen den Sauerstoff verarbeiten können, muss dieser jedoch erst in Lösung übergehen.
Die Sauerstoffausnutzung liegt mit konventionellen Membranbelüftern bei Luftblasengrößen von ca. 3 mm unter 60 % (Motarjemi und Jameson, 1978) und ist im Sinne eines energieeffizienten Betriebs unzureichend. Für eine nahezu vollständige Sauerstoffausnutzung bei den typischen Einblastiefen von 4 bis 6 m sind Luftblasendurchmesser im Bereich von ca. 1 mm ideal (Motarjemi und Jameson, 1978). Durch die feineren Blasen werden die pro eingetragenem Gasvolumen erzeugte Stoffübergangsfläche und die individuelle Verweilzeit der Blasen erhöht. Das erhöht den Sauerstoffübergang aus der Luftblase in den Belebtschlamm während des Blasenaufstiegs und führt zu einer deutlich größeren Sauerstoffeintragseffizienz. Daher besteht ein enormes Potenzial für Effizienzsteigerungen der Belüftung durch optimierte Begaserkonzepte.
Ein zielführender Ansatz zur Steigerung der Energieeffizienz in der Abwasserreinigung ist daher die Erzeugung kleinerer Luftblasen bei geringen Druckverlusten an den Be-

lüftern. Derzeit erhältliche Belüfter mit flexibler Membran erzeugen Luftblasen im Bereich um 3 mm. Hingegen zeigen Belüfter mit starren Lochöffnungen im Mikrometerbereich Blasengrößen im Bereich deutlich unter 3 mm. Die Kanülenbegaser der Firma IWEB wurden daher als Ausgangspunkt für das Forschungsvorhaben angesehen.

Ziel dieser Forschungsarbeit war die Charakterisierung von Belüftern mit starren Lochöffnungen wie die Kanülenbegaser bezüglich der effizienteren Belüftung von Belebtschlamm in der biologischen Abwasserreinigung. Dazu sollte die Sauerstoffzufuhr von Belüftern mit starren Öffnungen in Wasser bzw. Abwasser untersucht und mit dem Stand der Technik zu verglichen werden. Dazu wurden zuerst die initialen Blasengrößen von starren Öffnungen, wie sie in Kanülen und Lochplatten zu finden sind, mittels Videometrie untersucht. Dabei wurde auch der nötige Druck für die Blasenbildung bestimmt. Im weiteren Verlauf wurden kommerziell erhältliche Belüfter mit den neuartigen Edelstahlbelüftern mit starren Öffnungen in Bezug auf Sauerstoffzufuhr, Druckverlust und Sauerstoffertrag in Wasser und Belebtschlamm aus der Kläranlage miteinander verglichen. Weiterhin wurde untersucht, ob mit einer geringeren Einblastiefe weiterhin eine gleichwertige Sauerstoffzufuhr mit verringertem hydrostatischen Druck möglich ist. Mit den besten Belüftern der jeweiligen Belüfterformen wurde eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt.

# 2 Stand von Wissenschaft und Technik

## 2.1 Belüfter mit Mikrometeröffnungen

Ausgangspunkt des Forschungsprojektes ist die Entwicklung eines neuartigen Begaserkonzeptes durch die Firma IWEB im Jahr 2012. Die Umsetzbarkeit des Konzeptes wurde in ersten Voruntersuchungen mit gefertigten Labormustern durch das IWEB gezeigt und das Begaserkonzept auch zum Patent angemeldet. Der Ansatz dieses Konzeptes war die Erzeugung von feinen Luftblasen durch speziell gefertigte Öffnungen mit dem Ziel einer erhöhten Sauerstoffausnutzung. Auf diese Weise sollten zum einen kleinere Gasblasen als mit kommerziellen Belüftern erzeugt werden, zum anderen sollte die Koaleszenz vermieden werden.

In Abhängigkeit vom Durchmesser der Kanülen kann Luft bzw. ein Gas zum einen in Blasen mit Durchmessern von weniger als 3 mm zum Zeitpunkt des Austritts aus einer Kanüle austreten. Durch die niedrigen Blasendurchmesser und die Verhinderung der Koaleszenz steigen die Blasen mit deutlich niedrigerer Geschwindigkeit auf als Blasen mit größeren Durchmessern. Die niedrigere Aufstiegsgeschwindigkeit verlängert die Kontaktzeit einer Blase und erhöht damit die Zeit für den Stoffübergang des Sauerstoffs in der Gasblase in das Wasser bzw. den Belebtschlamm. Bedingt durch die längere Kontaktzeit zwischen Luftblase und Wasser wird mehr Sauerstoff aus der Blase in der Flüssigkeit gelöst. Daher muss weniger Luft in das Wasser gefördert werden, wodurch der Energiebedarf bzw. Energieverbrauch zur Luftförderung sinkt.

Die ursprünglichen Labormuster nutzten freistehende Edelstahl-Kanülen mit Außendurchmessern von 0,3…0,4 mm, die präzise auf einem Träger zu montieren sind. In einer weiterentwickelten Begaservariante befanden sich Kanülen in einem monolithischen Körper aus Gießharz mit Kanüleninnendurchmessern ab 0,05 mm bis 0,20 mm (siehe Abbildung 2.1). Da bei den Kanülenbegasern die Luft durch die Kanülen gedrückt werden muss, haben sie prinzipiell einen größeren Druckverlust als die kommerziellen Membranbelüfter mit ihrer dünnen, flexiblen Membran. Daher wurde das neue Begaserkonzept bis zum Projektstart weiterentwickelt. Anstatt Gießharzbegasern wurden Edelstahlbegaser bzw. -belüfter verwendet. Ein dünnes Edelstahlblech ersetzt in diesem Konzept die Kanülen. Für die im Forschungsprojekt verwendeten Testmodule (siehe Abbildung 2.1 c) wurden Edelstahlbleche in drei Varianten mit regelmäßigem Muster perforiert, nämlich 2900 Löcher mit 30 µm Durchmesser, 1500 Löcher mit 50 µm Durchmesser und 1300 Löcher mit 70 µm Durchmesser. Durch die

damalige Fertigungsvariante war die aktive Fläche auf 10x10 cm² begrenzt. Mit der gewählten Perforation wurde ein Kompromiss zwischen dem Lochabstand von 5 mm und einem möglichst geringen Druckverlust am Modul eingestellt. Für die Module mit 30 und 50 µm war somit der Lochabstand deutlich unter 5 mm.

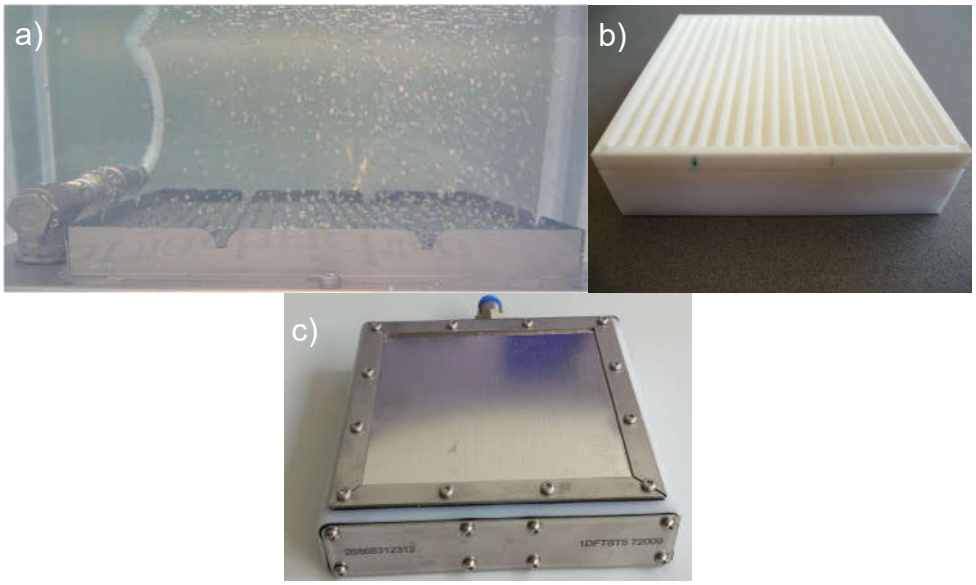


Abbildung 2.1: Kanülenbegaser im Betrieb (a), Gießharz-Kanülenbegaser (b) und Edelstahlbelüfter (c).

## 2.2 Bestimmung und Bewertung des Sauerstoffeintrages

### 2.2.1 Grundlagen der Absorptionsmethode

Der Sauerstoffeintrag wird durch den Belüftungskoeffizienten sowie das Sauerstoffzufuhrvermögen von Belüftungselementen beschrieben. Für deren Ermittlung werden Absorptions-, Desorptions- oder Abluftmessungen durchgeführt. Die in dieser Arbeit genutzte Absorptionsmessung ist die am häufigsten genutzte Methode und wird unter anderem in der DIN EN 12255-15 (2004) sowie dem Merkblatt DWA-M 209 (2007) detailliert erläutert.

Bei der Absorptionsmessung wird der Verlauf des Anstieges des Sauerstoffgehaltes in der flüssigen Phase bestimmt. Die Abbildung 2.2 zeigt schematisch den Konzentrations-Zeit-Verlauf für Reinwasser und Abbildung 2.3 für belebten Schlamm.

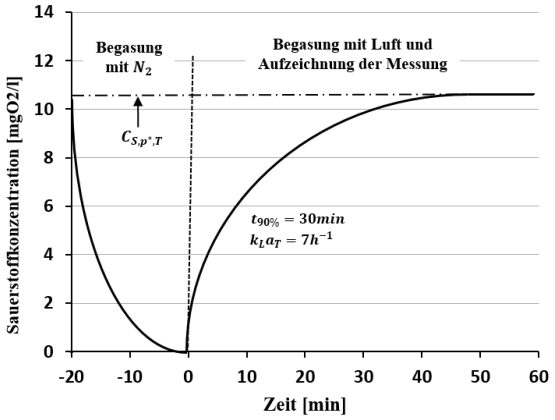


Abbildung 2.2: Sauerstoffkonzentrationsverlauf für die Absorptionsmethode in Wasser (DWA-M 209, 2007)

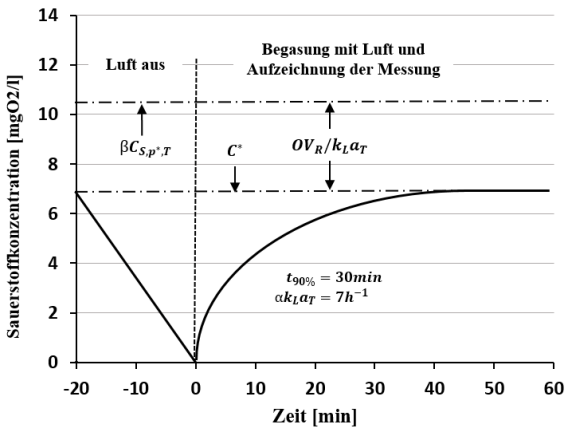


Abbildung 2.3: Sauerstoff-Konzentrationsverlauf für die Absorptionsmethode in Belebtschlamm (DWA-M 209, 2007)

Bei Versuchen in Reinwasser kann der Sauerstoffgehalt durch die Begasung mit Stickstoff abgesenkt werden. Eine Alternative zu Stickstoff stellt die Zugabe von Natriumsulfit mit Kobaltsalz als Katalysator dar. Der Nachteil dieser Variante ist, dass zusätzlich Chemikalien das Koaleszenzverhalten beeinflussen können. Ist der Sauerstoffgehalt abgesenkt, wird dieser durch Begasen mit Luft, reinem Sauerstoff oder unter Verwendung von Wasserstoffperoxid, bis zum Versuchs-Sauerstoffsättigungswert ($C_{S,p^*,T}$) wieder angehoben. Bei den Messungen mit belebtem Schlamm ist eine Senkung der Sauerstoffkonzentration durch die Atmung der Mikroorganismen möglich. Der Versuchs-Sauerstoffsättigungswert ($\beta C_{S,p^*,T}$) ist folglich nicht direkt messbar, jedoch kann der zusätzliche Sauerstoffverbrauch durch die Atmung mit einberechnet werden (siehe Gleichung (2.5)).

Mit dem Ansatz in Gleichung (2.1) wird die zeitliche Veränderung des Sauerstoffgehaltes beschrieben. Durch Integration und Umstellung ergibt sich das Regressionmodell für den Verlauf des Sauerstoffgehaltes in Gleichung (2.2). Die Konzentration des Sauerstoffs wird in Abhängigkeit von der Zeit erfasst. Hierfür werden laut DWA-M 209 (2007) mindestens 30 Wertepaare benötigt. Mittels nichtlinearer Regression lässt sich dieser Kurvenverlauf sowie der entsprechende Belüftungskoeffizient und der Versuchs-Sauerstoffsättigungswert ermitteln.

$$\frac{dC}{dt} = k_L a_T \cdot (C_S - C) \tag{2.1}$$

$$C_t = C_S - (C_S - C_0) \cdot e^{-k_L a_T \cdot t} \tag{2.2}$$

Aussagen über die Qualität der Messungen können durch die Residuen der Regression getroffen werden. Diese bilden die Differenz der Messwerte zu den mit Gleichung (2.2) ermittelten Modellwerten. Sind die Residuen zufällig gestreut, kann das Ergebnis als „in Ordnung“ bewertet werden. Anderweitig muss der Versuch wiederholt werden. Zur Vermeidung von fehlerhafter $k_La$-Ermittlung, müssen die Messungen in Abhängigkeit des $k_La$-Wertes und des $C_{S,p^*,T}$-Wertes laut DIN EN 12255-15 (2004) in einem Zeitintervall von mindestens $t = 3{,}5/k_La$ durchgeführt werden. Die geringste Sauerstoffkonzentration darf hierbei nicht höher als $C_0 = 0{,}25 \cdot C_{S,p^*,T}$ sein.

### 2.2.2 Parameter zur Beschreibung des Sauerstoffeintrages

Basierend auf den Ergebnissen der Absorptionsmethode werden aus dem Belüftungskoeffizienten und dem Versuchs-Sauerstoffsättigungswert, nach DIN EN 12255-15 (2004) und dem Merkblatt DWA-M 209 (2007), die Parameter für den Leistungsvergleich von Belüftungselementen hinsichtlich des Sauerstoffeintrages ermittelt. Aufgrund der Temperatur- und Druckabhängigkeit der Messergebnisse ist zunächst eine Normierung auf standardisierte Bedingungen nötig. Für den Diffusionskoeffizienten wird ein in der Abwassertechnik gebräuchlicher, empirischer Korrekturfaktor verwendet. Eine Normierung des Belüftungskoeffizienten erfolgt gemäß Gleichung (2.3) auf T = 20 °C. Für eine bestimmte Leistung eines Belüfters, in einem bestimmten Beckenvolumen ist der $k_La_{20}$-Wert als konstant anzusehen.

$$k_{\mathrm{L}}a_{20} = k_L a_T \cdot 1{,}024^{(20-T\mathrm{w})} \quad [\mathrm{h}^{-1}] \tag{2.3}$$

Der Versuchs-Sauerstoffsättigungswert wird, entsprechend der Gleichung (2.4), ebenfalls auf den Normdruck von p = 1013 hPa und T = 20 °C normiert. Der temperaturspezifische Standard-Sauerstoffsättigungswert ($C_{S,St,T}$-Wert) ist in der DIN EN 25814 (1992) gelistet. Es ist zu beachten, dass bei Versuchen im belebten Schlamm, der Versuchs-Sauerstoffsättigungswert ($\beta C_{S,p^*,T}$-Wert) nicht direkt gemessen werden kann. Hierfür erfolgt die Umrechnung nach Gleichung (2.5), unter Einbezug des Sauerstoffverbrauchs durch die Atmung der Mikroorganismen.

$$C_{S,20} = C_{S,p^*,T} \cdot \frac{C_{S,St,20}}{C_{S,St,T}} \cdot \frac{1013}{p^*} \quad [\mathrm{mg\ O_2/l}] \tag{2.4}$$

$$\beta C_{S,p^*,T} = C^* + \frac{OV_R}{\alpha k_L a_T} \quad [\mathrm{mg\ O_2/l}] \tag{2.5}$$

Mittels dieser normierten Parameter wird die Sauerstoffzufuhr *SOTR* (Standard

Oxygen Transfer Rate) nach Gleichung (2.6) berechnet. Der *SOTR* gibt an, wie viel Kilogramm Sauerstoff pro Stunde eine Belüftungseinrichtung unter Standardbedingungen (T = 20 °C und p = 1013 hPa), in einem bestimmten Volumen an Flüssigkeit löst. Für Versuche in belebtem Schlamm wird der *SOTR* entsprechend als *αSOTR* ermittelt.

$$SOTR = \frac{V_{ges} \cdot k_L a_{20} \cdot C_{S,20}}{1000} \quad [\text{kg } O_2/\text{h}] \tag{2.6}$$

Zwei weitere Kennwerte, welche oftmals in Datenblättern von Belüftern angegeben werden, die spezifische Standard-Sauerstoffausnutzung *SSOTE* (Specific Standard Oxygen Transfer Efficiency) und die spezifische Standard-Sauerstoffzufuhr *SSOTR* (Specific Standard Oxygen Transfer Rate) für die Versuche in Reinwasser, beziehungsweise der *αSSTOE* und der *αSSOTR*, für die Versuche in belebtem Schlamm. Diese Parameter werden in Abhängigkeit vom Norm-Luftvolumenstrom nach Gleichung (2.7) und Gleichung (2.8) ermittelt. Der *SSOTE* gilt im Gegensatz zum *SSOTR* nur für Einblastiefen bis zu 7 m und gibt das Verhältnis von der aufgenommenen Sauerstoff- zur eingeblasenen Sauerstoffmenge wieder.

$$SSOTE = \frac{100 \cdot SOTR}{h_D \cdot (Q_{L,St} \cdot 0{,}299)} \quad [\%/\text{m}] \tag{2.7}$$

$$SSOTR = \frac{SOTR}{Q_{L,St} \cdot h_D} \cdot 1000 \quad [\text{g } O_2/(\text{m}^3 \cdot \text{m})] \tag{2.8}$$

In belebtem Schlamm ist der $k_L a$-Wert und damit der Sauerstofftransport aufgrund der gelösten Stoffe und der partikulären Flocken meist kleiner als im Reinwasser. Zum Vergleich der Belüftungskoeffizienten in Reinwasser und belebten Schlamm wird der Grenzflächenfaktor *α* entsprechend Gleichung (2.9) herangezogen. Dieser *α*-Wert darf nur bei gleichen Versuchsparametern für Reinwasser und belebten Schlamm, insbesondere Belüftungseinrichtungen und Belüftungsintensität, ermittelt werden.

$$\alpha = \left( \frac{k_L a_{20}\ (f\ddot{u}r\ belebten\ Schlamm)}{k_L a_{20}\ (f\ddot{u}r\ Reinwasser)} \right) \quad [-] \tag{2.9}$$

Für den Vergleich des von Wasserinhaltsstoffen abhängigen Sauerstoffsättigungswertes, wird der Sauerstoffaufnahmefaktor β nach Gleichung (2.10) ermittelt. Dieser liegt in kommunalen Abwässern in der Regel bei einem Wert von β = 1 (DWA-M 209, 2007). Für hohe Salzkonzentrationen liegt dieser Wert aufgrund der verringerten Sauerstofflöslichkeit deutlich unter 1 (ATV-Handbuch, 1997).

$$\beta = \left(\frac{C_{S,St,20}(\text{für belebter Schlamm})}{C_{S,ST,20}(\text{für Reinwasser})}\right) \quad [-] \tag{2.10}$$

### 2.2.3 Einflüsse auf die Sauerstoffzufuhr

Wesentlichen Einfluss auf die Sauerstoffzufuhr haben neben der Abwasserzusammensetzung und Blaseneigenschaften auch das Belüftungssystem. Die Ausführung des Belüftungssystems ist entscheidend für die Blasengröße und der Blasenverteilung im Belebungsbecken. Wichtige Parameter in Bezug auf das Belüftungssystem sind Belegungsdichte, Einblastiefe, Luftbeaufschlagung und resultierende Blasengrößen.
Die Anordnung der Belüfter ist entscheidend für die Strömung innerhalb des Belebungsbeckens und beeinflusst maßgeblich den Stoffübergang. Bei der flächendeckenden Belüftung wird als Maß die Belegungsdichte verwendet, welche das prozentuale Verhältnis der gesamten Abgasfläche aller Belüftungselemente zur Belebungsbeckengrundfläche nach Gleichung (2.11) angibt. Die Abgasfläche beschreibt dabei die Fläche der Belüfter, von der sich die Luftblasen aktiv ablösen können.

$$B_D = \frac{n_{Bel} \cdot A_{Bel}}{A_{BB}} \quad [\text{m}^2/\text{m}^2, \%] \tag{2.11}$$

Dieser Definition nach liegen übliche Belegungsdichten im Bereich von 10 % (ATV-Handbuch, 1997). Das Merkblatt DWA-M 229-1 (2013) gibt Belegungsdichten zwischen 10 und 15 % in Abhängigkeit von der verfahrenstechnischen Funktion, wie Nitrifikation oder Schlammstabilisierung, an. Untersuchungen von Frey (1996), Pöpel et. al (1998) und Wagner (2002) ergaben, dass mit höheren Belegungsdichten die Sauerstoffzufuhr begünstigt wird.

## 2.3 Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Belüftungssystemen

Für eine wirtschaftliche und energetische Beurteilung eines Druckluftbelüftungssystems ist laut dem Merkblatt DWA-M 229-1 (2013), DWA-A 216 (2015) und DWA-M 229-2 (2016) eine Bilanzierung notwendig, bei der Investitionskosten und laufende Kosten zu berücksichtigen werden. Die Investitionskosten bei Druckbelüftungssystemen setzen sich unter anderem aus den Kosten für Gebläse, den Rohrleitungen und den Armaturen, den Belüfterelementen sowie der EMSR-Technik (Elektro-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik) zusammen. Als laufende Kosten gelten beispielsweise

Energiekosten für den Betrieb der Gebläse sowie Wartungs- und Instanthaltungskosten (DWA-M 229-1, 2013).

Als Parameter für den Gesamtenergiebedarf der Belüftung wird der spezifische Energiebedarf nach Gleichung (2.12) herangezogen. Dieser setzt sich aus dem Verhältnis des Strombedarfs und der Schmutzfrachtbelastung zusammen. Die Schmutzfrachtbelastung wird unter Berücksichtigung einer einwohnerspezifischen Fracht von 120 g/E·d CSB ermittelt.

$$e_{Bel} = \frac{E_{Bel}}{EW_{CSB}} \text{ [kWh/E·a]} \tag{2.12}$$

Eine Alternative hierzu stellt die spezifische Energieeffizienz einer Belüftung dar. Diese berücksichtigt die verfahrenstechnischen Randbedingungen der Belebungsanlage und errechnet sich nach Gleichung (2.13) (DWA-M 229-2, 2016). Der Strombedarf setzt sich hierbei aus dem spezifischen Leistungsbedarf der Drucklufterzeuger und etwaiger Einbauten, wie zum Beispiel Rührwerke, zusammen. Dieser kann oftmals nur direkt am Verbraucher ermittelt werden und ist von einer Vielzahl von Randbedingungen, wie Druckverluste und zum Einsatz kommende Verdichter abhängig.

$$e_{Bel,OV} = \frac{E_{Bel}}{OV_{h,aM} \cdot 8760} \text{ [kWh/kg } O_2\text{]} \tag{2.13}$$

Für eine Ermittlung des Strombedarfes der Belüftungselemente $E_{Bel}$, liefert das Merkblatt DWA-M 229-1 (2013) eine beispielhaft dargestellte Auslegung eines Druckbelüftungssystems. Bezogen auf einen fiktiven Lastenfall werden die erforderliche Sauerstoffzufuhr, der erforderliche Luftbedarf, die Anzahl der Belüfterelemente und die Druckverluste berechnet. Durch die anschließende Auslegung eines Verdichters, kann der gesamte Energiebedarf einer Belüftung abgeschätzt werden.

Eine Alternative zu dieser aufwendigen Berechnungsvariante bietet die Ermittlung des Standard-Sauerstoffertrages *SAE* (Standard Aeration Efficiency) nach Gleichung (2.14). Der *SAE*-Wert gibt an, welche Leistung für das Einbringen von Sauerstoff unter Standardbedingungen benötigt wird (DWA-M 209, 2007; DWA-M 229-1, 2013).

$$SAE = \frac{SSOTR \cdot h_D}{E} \text{ [kg } O_2\text{/kWh]} \tag{2.14}$$

Für die Ermittlung des spezifischen Energiebedarfs *E* nutzen Pöpel (1985), Pöpel & Wagner (1994), Frey (1996), Pöpel et. al (1998) sowie Thiersch (2001) den vereinfachenden Ansatz nach Gleichung (2.15). Die Berechnung erfolgt unter Einbezug der spezifischen Leistungskennwerte $E_0$ und $Y$ von Verdichtern.

$$E = E_0 \cdot (h_D + \frac{\Delta p}{98{,}07})^{\gamma} \text{ [Wh/m³]} \quad (2.15)$$

Aus Gründen der Vergleichbarkeit und der unterschiedlichen Größe der Belüfterelemente ist es sinnvoll den *SAE*-Wert auf die aktive Abgasfläche eines Elementes zu beziehen (Frey, 1996). Für den Sauerstoffertrag pro Belüftungsfläche folgt daher die Gleichung (2.16). Damit soll sichergestellt werden, dass eine Beurteilung unabhängig von der Belüftergröße erfolgen kann.

$$SAE_{Bel} = \frac{SAE}{A_G} \text{ [kg O2/(kWh·m²)]} \quad (2.16)$$

Ein weiterer Vergleichsparameter basiert auf dem Energiesatz. Der zum Einbringen von Sauerstoff erforderliche Energiebedarf der Belüftungselemente $E_H$ wird dabei über das eingetragene Luftvolumen und in Abhängigkeit von der Einblastiefe durch Gleichung (2.17) ermittelt.

$$E_H = \frac{V_L \cdot h_D \cdot g \cdot (\rho_W - \rho_L)}{1000} \text{ [kJ]} \quad (2.17)$$

# 3 Material und Methoden

## 3.1 Untersuchung von Einzelblasen und deren Initialverteilung

Zur Ermittlung der Einzelblasengrößen wurde die Messmethode der Videometrie genutzt. Sie stellt eine geeignete Messmethode zur Untersuchung von Zweiphasenströmungen in optisch transparenten Strömungskanälen dar. Dabei werden Bildsequenzen der Strömung mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet. Aus den Bildern können mit Hilfe von Bildverarbeitungsalgorithmen der Blasendurchmesser bestimmt und Blasengrößenverteilungen aufgestellt werden. Im folgenden Abschnitt wird die Methodik aufgezeigt wie die Größe von Einzelblasen von Kanülen und Lochblechen mittels einer hochauflösenden Highspeed-Kamera bestimmt wurde. Dabei wird auch auf die untersuchten Kanülen- und Lochblechkonfigurationen und den Versuchsstand eingegangen.
Für die Videometrie wurde die Durchlichttechnik genutzt. Der Aufbau ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Die Plexiglassäule mit den Maßen 250 x 50 x 1000 mm wird von einem 400 W LED Strahler durchleuchtet. Mittels einer Megaspeed X7 Pro color Hochgeschwindigkeitskamera wurden die aufsteigenden Blasen mit 500 Bildern pro Sekunde aufgenommen. Vier Druckluftmassenströme wurden untersucht: 5, 10, 20, 50 sml/min pro Mikroöffnung. Der Druckverlust bei der Belüftung durch die Mikroöffnungen wurde mit einem Relativdrucksensor bestimmt. Für die Blasengrößenbestimmung wurden 2100 Bilder, die mit für jeden Versuch aufgenommen wurden, mit einer am HZDR entwickelten Software analysiert (Ziegenhein et al. 2016).

Der Algorithmus extrahiert die einzelnen Blasen und berechnet den äquivalenten Kugeldurchmesser $d_E$. Aus der Gesamtheit der detektierten Blasen wird basierend auf den Blasengrößenklassen i der mittlere Sauterdurchmesser $d_{32}$ berechnet:

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^{n} N_i d_E^3}{\sum_{i=1}^{n} N_i d_E^2} \quad \text{[mm]} \tag{3.1}$$

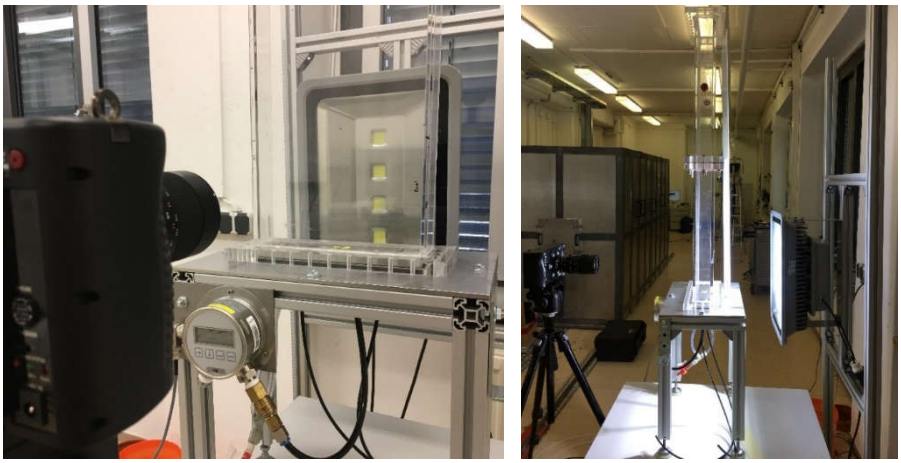

Abbildung 3.1: Videometrieversuchsstand mit Hochgeschwindigkeitskamera, LED-Lichtquelle und Strömungskanal.

## 3.2 Verwendete Kanülen und Lochplatten

Die zur Erzeugung feiner Luftblasen verwendeten Edelstahlkanülen und -lochplatten wurden für die Untersuchungen angefertigt. Es wurden Lochinnendurchmesser im Bereich zwischen 30 und 200 µm ausgewählt. Um den Einfluss unterschiedlicher geometrischer Parameter untersuchen zu können, wurden bei den Kanülen die Länge (5 und 15 mm) und der Schliff (30°, 60° und 90°) variiert (siehe Abbildung 3.2 und Tabelle 3.1).

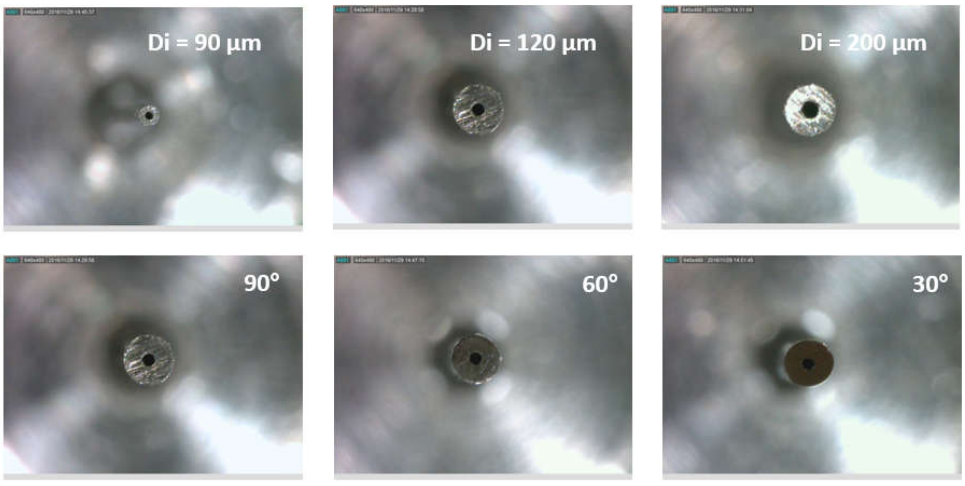


Abbildung 3.2: Mikroskopaufnahmen der Kanülenspitzen mit Innendurchmessern von 90 bis 200 µm und Schliffen von 30 bis 90°.

Bei den Lochplatten wurden neben Einzellöchern auch Lochzeilen untersucht. Die Lochplatten unterschieden sich in Lochdurchmesser, Lochabstand (5; 12,9 mm, siehe Abbildung 3.3), Oberflächenbeschaffenheit (elektropoliert und unpoliert) und Plattendicke (300 bzw. 500 µm). Die jeweiligen untersuchten Konfigurationen sind in Tabelle 3.2 aufgeführt.

Tabelle 3.1: Abmaße der verwendeten Kanülen.

| Bezeichnung | Lochinnendurchmesser [µm] | Länge [mm] | Schliff [°] |
|---|---|---|---|
| ID009_5mm_90° | 90 | 5 | 90 |
| ID009_15mm_90° | 90 | 15 | 90 |
| ID012_5mm_30° | 120 | 5 | 30 |
| ID012_5mm_60° | 120 | 5 | 60 |
| ID012_5mm_90° | 120 | 5 | 90 |
| ID012_15mm_30° | 120 | 15 | 30 |
| ID012_15mm_60° | 120 | 15 | 60 |
| ID012_15mm_90° | 120 | 15 | 90 |
| ID015_5mm_30° | 150 | 5 | 30 |
| ID015_5mm_60° | 150 | 5 | 60 |
| ID015_5mm_90° | 150 | 5 | 90 |
| ID015_15mm_30° | 150 | 15 | 30 |
| ID015_15mm_60° | 150 | 15 | 60 |
| ID015_15mm_90° | 150 | 15 | 90 |
| ID020_5mm_30° | 200 | 5 | 30 |
| ID020_5mm_60° | 200 | 5 | 60 |
| ID020_5mm_90° | 200 | 5 | 90 |
| ID020_15mm_30° | 200 | 15 | 30 |
| ID020_15mm_60° | 200 | 15 | 60 |
| ID020_15mm_30° | 200 | 15 | 90 |

Abbildung 3.3: Lochplatten mit unterschiedlichen Lochabständen. Lochöffnungen durch grüne Kreise markiert.

Tabelle 3.2: Spezifikationen der verwendeten Lochplatten (ep: elektropoliert, up: unpoliert).

| Bezeichnung | Lochdurchmesser [mm] | Lochanzahl [-] | Lochabstand [mm] | Oberfläche | Dicke [µm] |
|---|---|---|---|---|---|
| 1-5-3-30µm | 30 | 1 | - | ep | 300 |
| 1-5-3-50µm | 50 | 1 | - | ep | 300 |
| 1-5-3-70µm | 70 | 1 | - | ep | 300 |
| 1-5-3-90µm | 90 | 1 | - | ep | 300 |
| 1-5-5-120µm | 120 | 1 | - | ep | 500 |
| 1-5-5-150µm | 150 | 1 | - | ep | 500 |
| 1-5-5-200µm | 200 | 1 | - | ep | 500 |
| 1-12,9-3-120µm | 120 | 1 | - | ep | 300 |
| 1-12,9-5-120µm | 120 | 1 | - | ep | 500 |
| R1-5-3-50µm | 50 | 1 | - | up | 300 |
| R1-5-3-70µm | 70 | 1 | - | up | 300 |
| R1-5-3-120µm | 120 | 1 | - | up | 300 |
| 11-5-3-30µm | 30 | 11 | 5 | ep | 300 |
| 11-5-3-50µm | 50 | 11 | 5 | ep | 300 |
| 11-5-3-70µm | 70 | 11 | 5 | ep | 300 |
| 11-5-3-90µm | 90 | 11 | 5 | ep | 300 |
| 11-5-5-120µm | 120 | 11 | 5 | ep | 500 |
| 11-5-5-150µm | 150 | 11 | 5 | ep | 500 |
| 11-5-5-200µm | 200 | 11 | 5 | ep | 500 |
| 11-12,9-3-120µm | 120 | 11 | 12,9 | ep | 300 |
| 11-12,9-5-120µm | 120 | 11 | 12,9 | ep | 500 |
| R11-5-3-50µm | 50 | 11 | 5 | up | 300 |
| R11-5-3-70µm | 70 | 11 | 5 | up | 300 |
| R11-5-3-120µm | 120 | 11 | 5 | up | 300 |

## 3.3 Experimente im Technikumsmaßstab

Die experimentellen Untersuchungen zum Sauerstoffeintrag in Reinwasser und Belebtschlamm wurden in einer Technikumsanlage durchgeführt, die für die Versuche errichtet wurde. Im Folgenden werden der Aufbau der Anlage und die Methodik von Absorptionsversuchen und Experimenten zur Bestimmung der Reinigungsleistung der verschiedenen Belüfter erläutert. Weiterhin wird kurz auf die verwendeten Belüfter eingegangen.

### 3.3.1 Versuchsaufbau der Technikumsanlage

Die Technikumsanlage ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Sie besteht aus zwei Blasensäulen, welche im Technikum der Abteilung Experimentelle Thermofluiddynamik des HZDR aufgebaut wurden. Die baugleichen und aus Edelstahl gefertigten Säulen haben eine maximale Füllhöhe von 5 m und einen Durchmesser von 0,9 m. Das maximale Füllvolumen pro Säule beträgt rund 3 m³.
Diese Blasensäulen wurden mit einer Reihe von Sensoren für die Messung von Sauerstoffeintrag und Reinigungsleistung ausgerüstet. Für die Messung des Sauerstoffgehalts dienen jeweils drei optische Sauerstoffsensoren. Die Sauerstoffsensoren wurden in unterschiedlichen Eintauchtiefen (vgl. Abbildung 3.4) installiert. Sie verfügen über einen Messbereich von 0 bis 20 mg $O_2$/l.
Weiterhin ist in jeder Blasensäule jeweils eine ionenselektive Kombielektrode für Ammonium und Nitrat verbaut, welche zusätzlich mit einer Kompensationselektrode für Natrium ausgestattet ist. Durch diese Kombielektrode ist es möglich den für die Bestimmung der Reinigungsleistung wichtigen Ammoniumabbau zu erfassen.
Der Luft- bzw. Stickstoffmassenstrom wird mittels Massendurchflussregler eingestellt. Für die Erfassung des Druckverlustes der Belüfter ist ein tauchbarer Relativdrucksensor verbaut. Dieser befindet sich direkt am Belüfter. Der Umgebungsluftdruck im wird mit einem Drucksensor erfasst. Der Füllstand der Säulen wird mit einen Radar-Füllstandssensor gemessen. Alle verbauten Sensoren sind in Tabelle 3.3 aufgeführt.

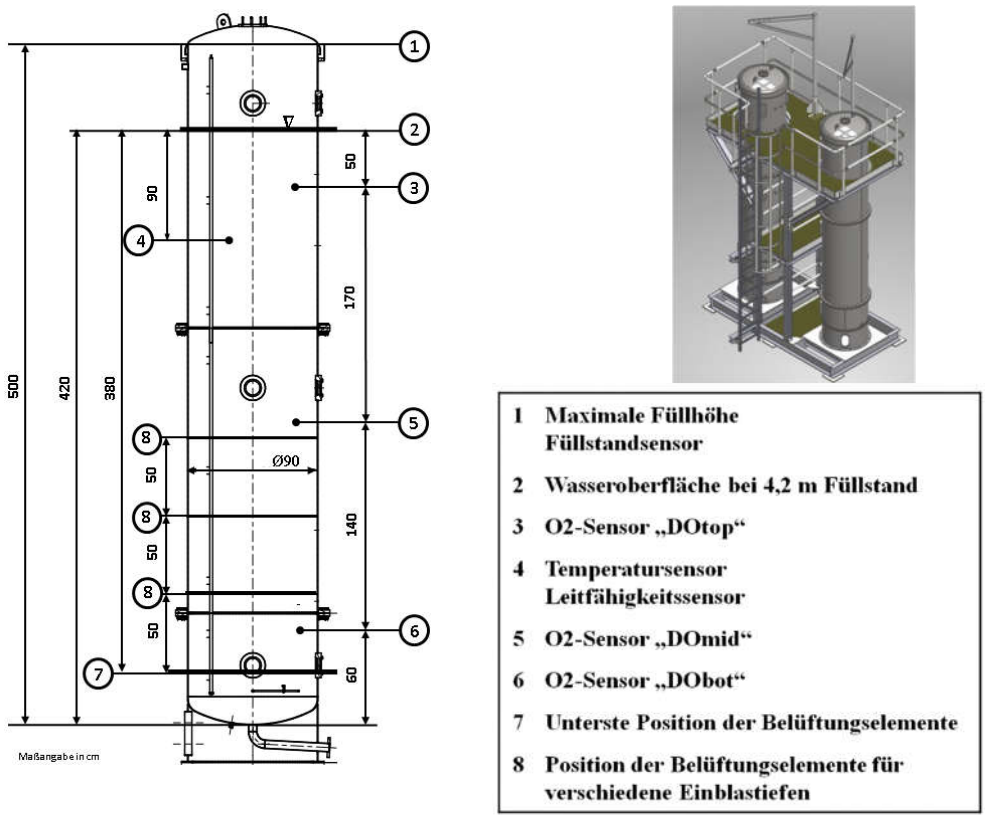


Abbildung 3.4 Schematische Darstellung der Blasensäulen.

Tabelle 3.3: Sensoren an der Versuchsanlage für das SEBAK-Projekt

| Gemessene Größe | Sensor | Messbereich |
|---|---|---|
| Gelöst-Sauerstoff | Georg Fischer AG, Typ Signet 2610 | 0-20 mg/l |
| Ammonium/Nitrat | WTW VARiON Plus 700 IQ | 0,1 – 1000 mg/l |
| Gasmassestrom | Omega Engineering FMA-2600 | 250 sl/min |
| Druckverlust | BD Sensors DMK 457 | 0-600 mbar |
| Umgebungsdruck | BD Sensors DMP 321 | 800-1200 mbar |
| Wassertemperatur | Endress & Hauser Easytemp TMR31 | -50 – 200 °C |
| Leitfähigkeit | Krohne Messtechnik Smartpat Cond 1200 | 0,1-20 mS/cm |
| Füllstand | Vega Grieshaber Vegapuls WL61 | 0-15 m |

Die Positionierung der Belüfter erfolgt von oben an einem beweglichen Schlitten. Dieser wird mittels Kran in die Säulen herabgelassen und durch die seitlich angebrachten Schienen mittig ausgerichtet. Damit können die Schlitten stufenlos verstellt und bis zu einer maximalen Eintauchtiefe von 4,4 m eingebracht werden. Durch die Schaugläser auf unterschiedlichen Höhen wird eine optische Überprüfung der korrekten Belüfterfunktion und des Blasenbildes ermöglicht.

Zur Regelung des Sauerstoffgehaltes während eines Reinigungsversuches wurde ein PID-Regler implementiert. Als Stellgröße dient dabei der Druckluftmassestrom. Auf diese Weise wird der Sollwert des Sauerstoffgehaltes während des Ammoniumabbaus gehalten.

### 3.3.2 Auswahl der Belüfter und Betriebsbedingungen

Für die Versuche in der Technikumsanlage wurden neben den neuartigen Edelstahlbelüftern kommerzielle Teller-, Rohr- und Plattenbelüfter verwendet. In Tabelle 3.4 sind die wichtigsten Kenndaten aller genutzten Belüfter zusammengefasst.

Tabelle 3.4 Übersicht der Belüfterkenndaten

| Bezeichnung | $A_{Bel}$ [m²] | Außen-Ø [mm] | Länge [mm] | Breite [mm] | Lochanzahl (abgeschätzt) | Mittlere Lochdichte pro cm² | Loch-Ø [mm] | Schlitzlänge [mm] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| TB1 | 0,070 | 350 | - | - | 7100 | 10,14 | 1 | - |
| TB2 | 0,070 | 350 | - | - | 3600 | 5,14 | - | 2 |
| TB3 | 0,055 | 278 | - | - | 7500 | 13,64 | - | 1,5 |
| TB4 | 0,038 | 265 | - | - | 5800 | 15,26 | - | 1,0 |
| TB5 | 0,060 | 346 | - | - | 8000 | 13,33 | - | 1,0 |
| TB6 | 0,080 | 320 | - | - | 3700 | 4,63 | 1 | - |
| RB1 | 0,075 | 75 | 530 | - | 7500 | 10,00 | - | 1,0 |
| RB2 | 0,090 | 65 | 580 | - | 9100 | 10,11 | - | 1,0 |
| RB3 | 0,090 | 70 | 600 | - | 14300 | 15,89 | - | 1,5 |
| PB1 | 0,100 | - | 675 | 215 | 9300 | 9,30 | 1 | - |
| EB1 | 0,010 | - | 135 | 135 | 2900 | 29,00 | 0,03 | - |
| EB2 | 0,010 | - | 135 | 135 | 1500 | 15,00 | 0,05 | - |
| EB3 | 0,010 | - | 135 | 135 | 1300 | 13,00 | 0,07 | - |

Belüftertyp: TB1 bis TB6 Tellerbelüfter; RB1 bis RB3 Rohrbelüfter; PB1 Plattenbelüfter; EB1 bis EB3 Edelstahlbelüfter

Die kommerziellen Teller-, Rohr- und der Plattenbelüfter besitzen eine gelochte beziehungsweise geschlitzte Polyurethan-, Ethylenpropylendienkautschuk- oder Silikon-Membran. Die Installation dieser Elemente in den Blasensäulen ist in Abbildung 3.5 beispielhaft dargestellt. Je nach Form wurden die weiteren Belüfter analog installiert.

(a) (b) (c) (d)

Abbildung 3.5: Anordnung der Belüfter in den Blasensäulen (a) einzelner Tellerbelüfter, (b) zwei Tellerbelüfter, (c) Rohrbelüfter und (d) Plattenbelüfter

Da die Testmodule der Edelstahlbelüfter mit einer aktiven Fläche von 0,01 m² deutlich kleiner sind als die kommerziellen Belüfter, wurden für Vergleichszwecke jeweils vier Elemente mit gleicher Lochgröße verschaltet und gleichzeitig mit Luft beaufschlagt. Dies ermöglichte zusätzlich die Untersuchung verschiedener Belüfteranordnungen (vgl. Abbildung 3.6). Für die Simulation eines Plattenbelüfters, wurde beispielsweise die Anordnung in Reihe (Variante 1) verwendet. Damit ergab sich für diese Anordnung eine Gesamtabgasfläche von 0,04 m². Aufgrund der Verwendung dünner Edelstahlbleche wurde der maximale Gasmassestrom für die Edelstahlbelüfter so gewählt, dass der Druckverlust nicht über 160 mbar ansteigt. Ein zu hoher Druckverlust hat sonst eine Beschädigung der Belüfter zu folge.

(a) (b) (c)

Abbildung 3.6: Edelstahlbelüfter Anordnung Variante 1 (a), Edelstahlbelüfter Anordnung Variante 2 (b), Edelstahlbelüfter Anordnung Variante 3 (c).

### 3.3.3 Auswertung der Absorptionsversuche

Die Algorithmen zur Auswertung der Sensordaten wurden in MATLAB (2015b) implementiert. Dazu wurde die Auswertung der Absorptionsversuche nach den Hinweisen im DWA-M 209 (2007) programmiert. Durch eine nichtlineare Regression wird der volumetrische Stoffübergangskoeffizient (Belüftungskoeffizient) $k_L a_T$ für jede Messung ermittelt. Gemäß Gleichungen (2.7) und (2.8) wurden dann *SSOTR* und *SSOTE* ermittelt.

Zur Ermittlung des Standard-Sauerstoffertrages (siehe Abschnitt 2.3) wurde die Nutzung eines Drehkolbenverdichters mit den Leistungsparametern $E_0$ = 4,3 und $\gamma$ = 1 angenommen (Pöpel & Wagner, 1994). Der Druckverlust wurde mittels Gleichung (3.2) aus der Differenz von Relativdruck und hydrostatischen Druck berechnet.

$$\Delta p = p_r - p_h = p_r - (\rho_W \cdot g \cdot h_d) \quad \text{[mbar]} \tag{3.2}$$

### 3.3.4 Durchführung der Reinigungseffizienzversuche

Zur Bewertung und zum Vergleich der Reinigungsleistung der besten Belüfter aus den Absorptionsversuchen in Reinstwasser wurden ca. 6 m³ Belebtschlamm pro Versuchstag angeliefert und in Versuchen vor Ort nitrifiziert. Die Belüftereffizienz wird dann anhand des Luft- und Energiebedarfs für den Ammoniumabbau bewertet. Die vorgeschaltete Denitrifikation wurde gewählt, um einen möglichst hohen Ammoniumgehalt zu Beginn des Versuchs zu erhalten. Der Belebtschlamm wurde mit einem Saugtankwagen aufgenommen und transportiert und dann mit mittels Überdruck direkt in die Technikumsanlage befördert. Während des Füllvorganges wurde der Schlamm mit Stickstoff begast, um eine frühzeitige Nitrifikation zu unterdrücken und dennoch eine Durchmischung zu gewährleisten.
In Tabelle 3.5 sind die Belüfter aufgeführt, die zugleich im Nitrifikationsversuch liefen.

Tabelle 3.5: Versuche für die Bestimmung der Reinigungseffizienz mit Belebtschlamm. Zusammenstellung der verwendeten Belüfter.

| Versuchsnummer | Sollwert [mg/l] | Belüfter in Säule 1 | Belüfter in Säule 2 |
|---|---|---|---|
| 1 | 2,0 | Edelstahl 70 µm | Tellerbelüfter 4 |
| 2 | 2,0 | Edelstahl 50 µm | Tellerbelüfter 4 doppelt |
| 3 | 2,0 | Edelstahl 30 µm | Tellerbelüfter 3 |
| 4 | 2,0 | Rohrbelüfter 1 | Plattenbelüfter 1 |
| 5 | 1,5 | Edelstahl 50 µm | Tellerbelüfter 4 doppelt |
| 6 | 1,0 | Edelstahl 30 µm | Tellerbelüfter 3 |
| 7 | 1,0 | Edelstahl 50 µm | Tellerbelüfter 4 doppelt |

### 3.3.5 Bestimmung der Reinigungseffizienz mit belebtem Schlamm

Ziel der Bewertung der Reinigungseffizienzuntersuchungen ist eine Abschätzung wie viel Luft bzw. wie viel Energie für den Ammoniumabbau benötigt wird. Dazu werden die Verhältnisse über abgebaute Ammoniummasse zu eingesetzter Luftmasse bzw. eingesetzter Energie aufgestellt und verglichen.
Aus der Anfangskonzentration und dem Füllvolumen wird die initiale Ammoniummasse berechnet:

$$m_{NH_4} = c_{NH_4} \cdot V_{Ges} \quad \text{[kg]} \tag{3.3}$$

Der spezifische Energiebedarf der Verdichter *E* wird nach Gleichung (2.15) berechnet. Mit der eingesetzten Druckluftmasse ergibt sich daraus die geleistete Arbeit $E_{Bel}$. Mit dieser wird dann das Verhältnis aus Abbaumasse $m_{NH4}$ und benötigter Arbeit berechnet:

$$E_{Bel} = E \cdot V_{Luft} \quad \text{[Wh]} \tag{3.4}$$

$$P_{NH_4} = m_{NH_4} / E_{Bel} \quad \text{[kg NH4/ Wh]} \tag{3.5}$$

# 4 Ergebnisse und Auswertung

## 4.1 Videometrieuntersuchungen von Einzelblasen

Im Diagramm in Abbildung 4.1 sind die mittleren Sauterdurchmesser von Kanülen, Einzellöchern und Lochplatten in Abhängigkeit vom Öffnungsdurchmesser gegenübergestellt. Weiterhin sind die Druckverluste dargestellt. Die Kanülen weisen im Bereich von 90 bis 200 µm Öffnungsdurchmesser die kleinsten Luftblasen auf, jedoch steigt der Druckverlust mit sinkendem Kanülendurchmesser und liegt bei 90 µm bereits über 100 mbar. Mit Einzellöchern sind bei 90 µm geringfügig größere Blasengrößen als bei den Kanülen möglich. Jedoch ist der Druckverlust deutlich niedriger, da die Druckluft nur die 300 µm starke Lochplatte anstatt 5 mm Kanüle durchdringen muss. Mit den drei Varianten ist die Bildung von Blasengrößen möglich, die vergleichbar mit denen von Membranbelüftern sind. Je nach Öffnungsdurchmesser ist auch eine Bildung kleinerer Blasen möglich. Durch die Bildung feiner Blasen ist somit die Grundlage geschaffen, die Sauerstoffzufuhr durch die höhere Grenzfläche zu erhöhen. Dabei spielen Faktoren wie die Lochabstände, Belegungsdichten und Gasmasseströme eine wichtige Rolle.

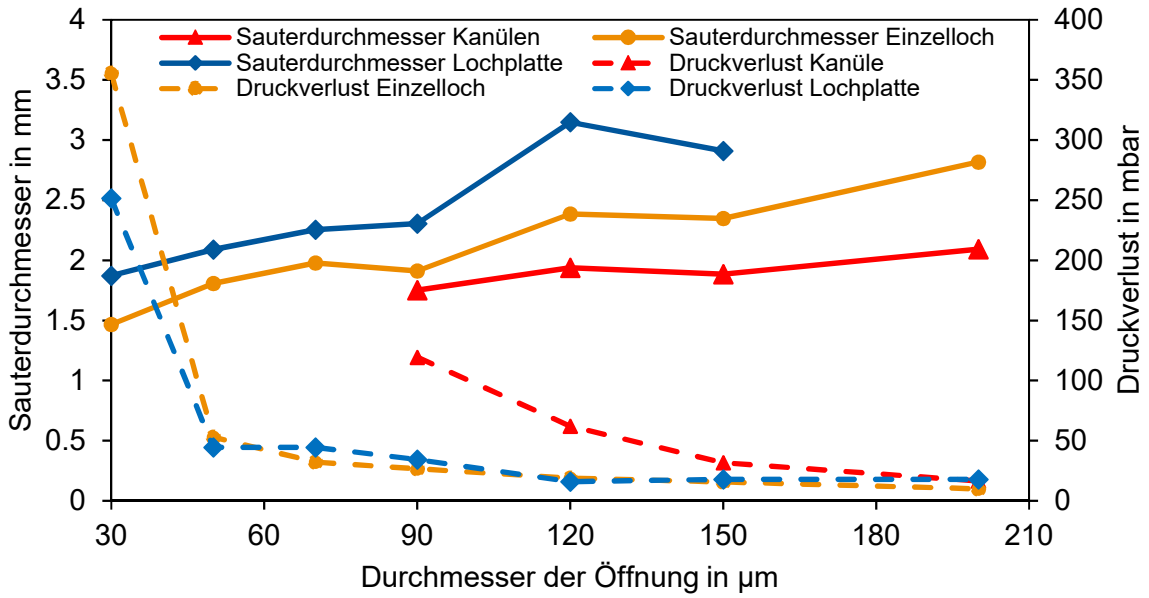


Abbildung 4.1: Vergleich der Sauterdurchmesser und des Druckverlustes bei Blasenbildung mit Kanülen, Einzellöchern und Lochplatten (5 mm Lochabstand) in Abhängigkeit vom Lochdurchmesser für einen Gasvolumenstrom von 10 sml/min pro Öffnung.

Mit Lochöffnungen auf Lochplatten können vergleichbare Blasendurchmesser wie an Kanülen erreicht werden und das bei geringeren Druckverlusten. Daher sind diese den

Kanülen vorzuziehen. Weiterhin erscheinen Lochdurchmesser über 50 µm energetisch günstiger, da ein kleiner mittlerer Sauterdurchmesser bei noch geringen Druckverlust erreicht wird. Im Vergleich zu den konventionellen Membranbelüftern ist eine Reduzierung der Blasengröße um bis zu 30 % möglich bei einem Lochdurchmesser von 50 µm bei rund 10 sml/min. Die Oberfläche spielt eine wichtige Rolle in Bezug auf die Blasengrößen. So weisen polierte Oberflächen feinere Blasen auf als die unpolierten Edelstahloberflächen. Geringe Plattendicken sind aufgrund von Blasengrößen und geringen Druckverlusten zu bevorzugen. Bei den untersuchten Lochabständen zeigte ein Abstand von 5 mm Vorteile gegenüber den Der Abstand der Löcher auf Lochplatten sollte 5 mm nicht überschreiten, aber auch nicht zu klein sein, da sonst die Blasenkoaleszenz bei der Blasenbildung die positiven Effekte aufheben würde. Bei Lochplatten ist weiterhin zu berücksichtigen, dass es eines Mindestdurchsatzes für kontinuierliche Blasenbildung bedarf. Dieser war bei den verwendeten Lochöffnungen bei rund 5 sml/min. Ist der Luftdurchsatz zu gering, führt dies zu größeren Blasengrößen aufgrund der unregelmäßigen Beaufschlagung der einzelnen Öffnungen.

## 4.2 Sauerststoffeintrag

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse aus den Sauerstoffeintragsversuchen in der Technikumsanlage vorgestellt. Für die Ermittlung der Parameter *SSOTR* und *SAE* wurde die Absorptionsmethode genutzt. Die Absorptionsmessungen wurden zuerst in Reinstwasser mit der gesamten Belüfterauswahl (siehe Tabelle 3.4) durchgeführt.
Die energetisch besten Belüfter der einzelnen Bauformen sowie alle Edelstahlbelüfter wurden danach in salzversetztem Wasser und in Belebtschlamm getestet.

### 4.2.1 Sauerstoffeintrag in Reinstwasser

Die Ergebnisse der Messungen mittels Absorptionsmethode in Reinstwasser sind nachfolgend entsprechend der Belüfterbauform gegliedert. Zuerst werden die Tellerbelüfter bewertet. Darauf folgen Rohr-, Platten- und Edelstahlbelüfter. Alle Messungen wurden mit entionisiertem Wasser in der Technikumsanlage durchgeführt. Alle Belüfter waren neu und wurden entsprechend der Herstellerangaben für die Experimente vorbereitet bzw. eingefahren.
Hier ist die Auswahl energetisch effizientesten Belüftungselemente aufgeführt. Die

Verläufe des *SSOTR* und des $SAE_{Bel}$ zeigen, dass bei allen untersuchten Belüftern die höchsten Werte bei niedrigen Gasmassesträmen erreicht wurden. Das heißt, dass in diesen Bereichen der Belüfter am effizientesten arbeitet. Die Hemmung des Stoffübergangs bei hohen Massenströmen liegt in größeren mittleren Sauterdurchmessern der initialen Blasengrößenverteilung und einer höheren Koaleszenzrate in der aufsteigenden Blasenfahne begründet. Je größer der Gasmassestrom ist, desto größere Luftblasen entstehen. Entsprechend nehmen die Größe der Phasengrenzfläche ab und die Schwarmgeschwindigkeit zu.

Zur Reduzierung der Auswahl an zu untersuchenden Belüftern in den nachfolgenden Untersuchungen, sind die energetisch effektivsten Belüftungselemente je nach Belüfterform ausgewählt worden. Hierfür dient der Sauerstoffertrag pro Abgasfläche als Auswahlkriterium. Abbildung 4.2 zeigt den Teller-, Rohr- sowie Plattenbelüfter und die drei Edelstahlbelüfter (nach Variante 1) mit den höchsten $SAE_{Bel}$-Werten.

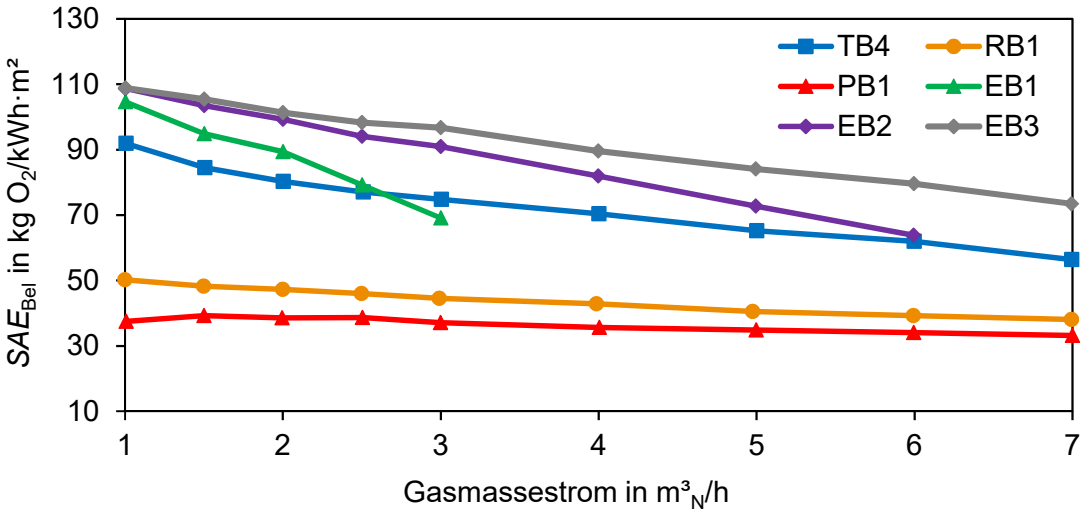


Abbildung 4.2: Gegenüberstellung des Sauerstoffertrages der effektivsten Belüftungselemente nach Belüftertyp.

Generell erzielen die Edelstahlbelüfter gegenüber den kommerziellen Belüftern die höheren Sauerstoffertragswerte. Eine Ausnahme bilden lediglich die Edelstahlbelüfter mit 30 µm Lochdurchmesser (EB1) bei einem Gasmassestrom von mehr als 3 $m^3_N$/h. Werden die Messergebnisse für 1 $m^3_N$/h verglichen so wird deutlich, dass die Edelstahlbelüfter eine Steigerung des $SAE_{Bel}$-Wertes gegenüber dem Plattenbelüfter 1 um etwa das 3,6-fache besitzen. Gegenüber dem RB1 ist einer Erhöhung des $SAE_{Bel}$-Wertes um etwa das 2,2-fache und gegenüber dem Tellerbelüfter 4 um etwa das 1,2-fache zu verzeichnen. Dies zeigt, dass gegenüber dem Druckverlust die Größe der Luftaustrittsöffnungen und somit die Größe der Luftblasen von übergeordneter Bedeutung für den

Stoffübergang und damit auch für die Belüftungseffizienz sind. Dass die Edelstahlbelüfter effektiver den Sauerstoff eintragen können, wird ebenfalls durch die in Abbildung 4.3 dargestellten *SSOTR*-Werte gestützt.

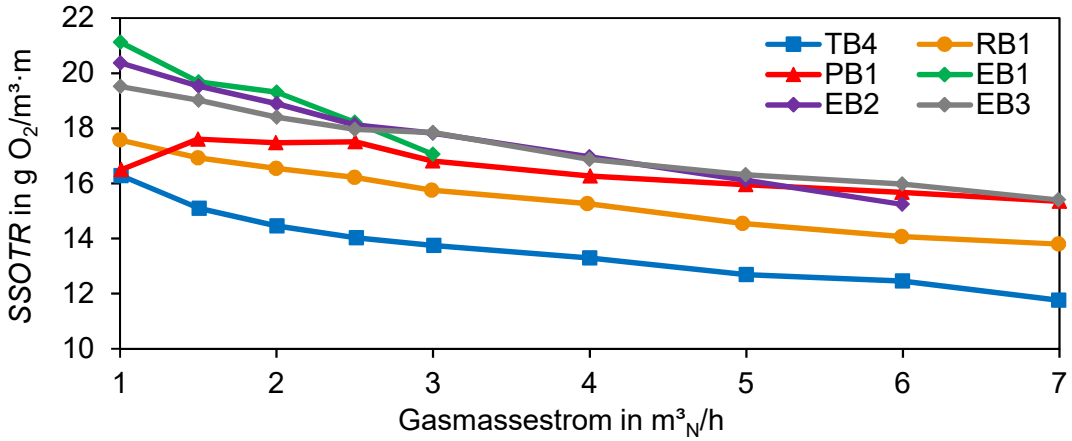


Abbildung 4.3: Gegenüberstellung der Spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr der in Abhängigkeit des Sauerstoffertrages effektivsten Belüftungselemente.

Dabei wird gezeigt, dass auch ohne Einbezug der Abgasfläche, bei einem geringen Gasmassestrom die Edelstahlbelüfter wesentlich höhere *SSOTR*-Werte erzielen. Die Untersuchungen zeigen zudem das komplexe Zusammenspiel von Material, Bauform, Loch-/ Schlitzanzahl und Größe sowie Gasmassestrom und Strömungseffekte. Die Leistungsfähigkeit der einzelnen Belüfter ist demnach stets individuell zu bestimmen. Für die im Rahmen dieser Arbeit gewählten Betriebs- und Rahmenbedingungen sowie der Belüfterauswahl ergibt sich die Erkenntnis, dass die Edelstahlbelüfter gegenüber den Teller-, den Rohr- und den Plattenbelüfter in Bezug auf Sauerstoffzufuhr, energetisch effizienter sind.

Für die Bewertung der unterschiedlichen Anordnungen der Edelstahlbelüfter, wur-den ausschließlich Versuche mit den Edelstahlbelüftern EB3 durchgeführt. Die Abbildung 4.4 zeigt hierfür die spezifische Standard-Sauerstoffzufuhr der in Reihe geschalteten Variante 1, sowie der symmetrisch angeordneten Varianten 2 und 3 (vgl. Abbildung 3.6). Der Verlauf der Messergebnisse zeigt, dass der Aufbau nach Variante 2 eine Erhöhung des *SSOTR*-Wertes zur Folge hat. Es wird ersichtlich, dass unabhängig von der Abgasfläche, allein die Anordnung der Elemente maßgeblichen Einfluss auf die Effizienz besitzt.

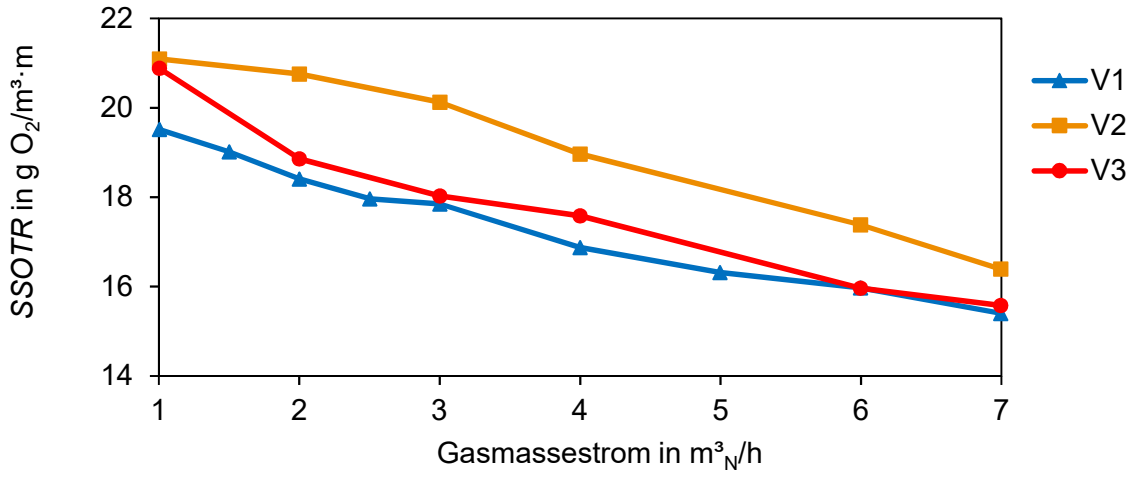


Abbildung 4.4: Gegenüberstellung des Verlaufes der Spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr der Edelstahlbelüfter EB3 mit Variation der Anordnung.

### 4.2.2 Sauerstoffeintrag in salzhaltiges Wasser

Mit einer reduzierten Belüfterauswahl wurden Experimente mit salzhaltigem Wasser durchgeführt, damit Aussagen über den Einfluss des Salzes und damit der Oberflächenspannung auf den Sauerstoffeintrag getroffen werden können. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Versuche im salzversetzten Wasser mit denen im entionisiertem Wasser verglichen.

Die in der Abbildung 4.5 dargestellten Verläufe der spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr zeigen, dass im Salz versetzten Wasser deutlich höhere *SSOTR*-Werte gegenüber den Versuchen im entionisierten Wasser erzielt werden. Dies gilt für alle untersuchten Belüfter und Gasmasseströme.

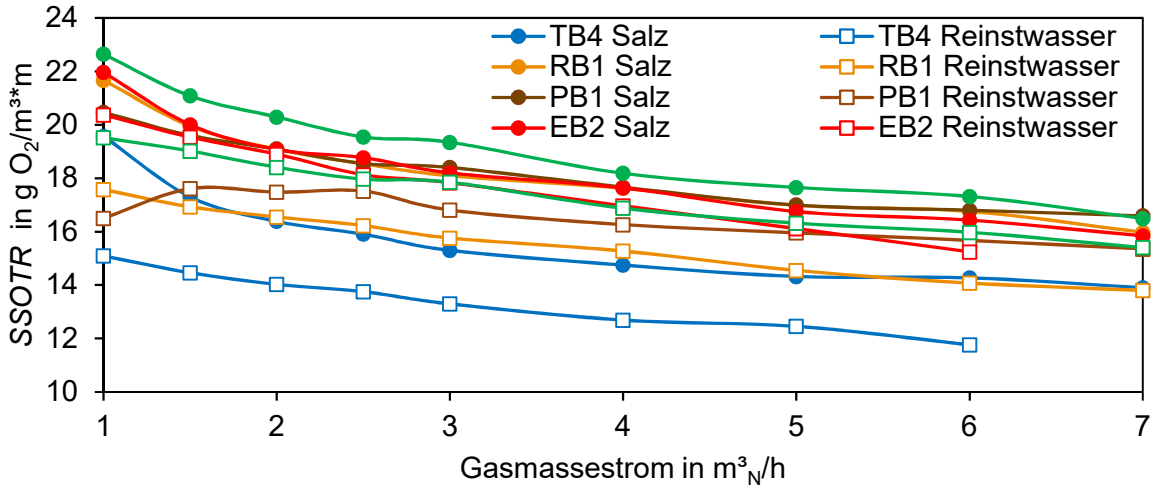


Abbildung 4.5: Gegenüberstellung der spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr der Belüfter im entionisiertem und salzversetztem Wasser mit $C_{Na_2SO_4} = 0{,}5\ g/l$.

Das Ergebnis entspricht den Erwartungen, dass die Salze eine koaleszenzhemmende Wirkung besitzen und somit den mittleren Blasendurchmesser und die Blasenaufstiegsgeschwindigkeit verringern. Der daraus resultierende begünstigte Stoffübergang gas/flüssig entspricht den Erkenntnissen von Zlokarnik (1998), Steinmetz (1996), Beyersdorf (1997) und Wagner (2002).

Bei der Betrachtung des in der Abbildung 4.6 dargestellten Sauerstoffertrages wird gezeigt, dass die Zugabe von Salz diesen ebenfalls bei allen untersuchten Belüftern erhöht.

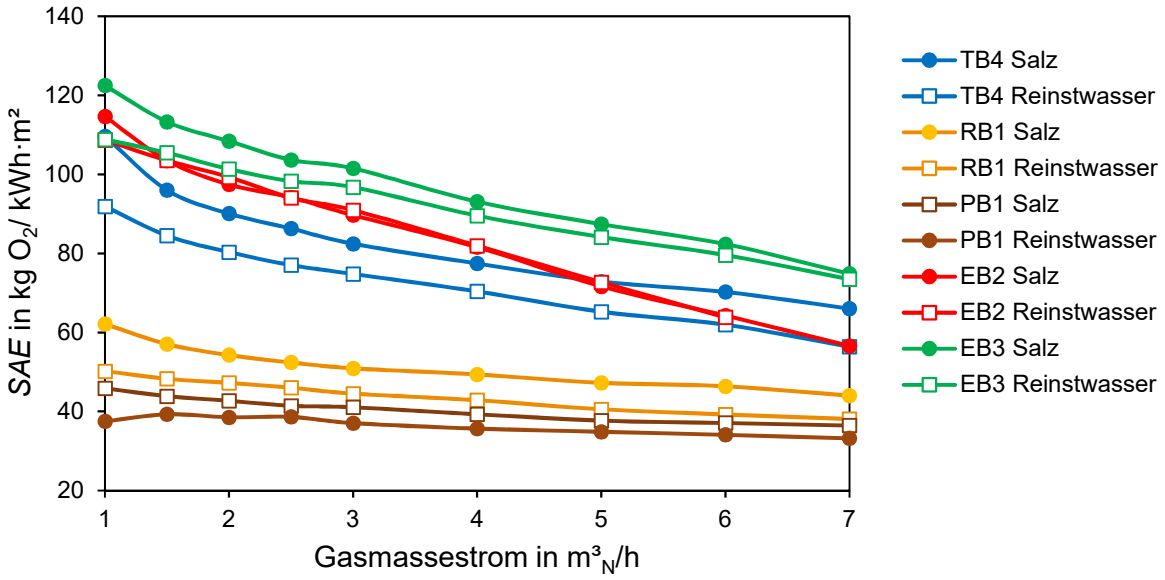


Abbildung 4.6: Gegenüberstellung des Sauerstoffertrages der Belüftungselemente im entionisiertem und salzversetztem Wasser mit $C_{Na_2SO_4} = 0{,}5\ g/l$.

Werden die in der Abbildung 4.7 dargestellten Verläufe der Druckverluste betrachtet, so ist zu erkennen, dass dieser bei allen untersuchten Belüftungselementen zunimmt. Zu begründen ist dies mit der Erhöhung der Oberflächenspannung durch das im Wasser gelöste Salz. Diese bewirkt einen Anstieg des Kapillarkräfte und somit des Druckverlustes bei der Blasenbildung. Im Sauerstoffertrag wird diese Druckerhöhung jedoch durch die höhere Standard-Sauerstoffzufuhr überkompensiert.

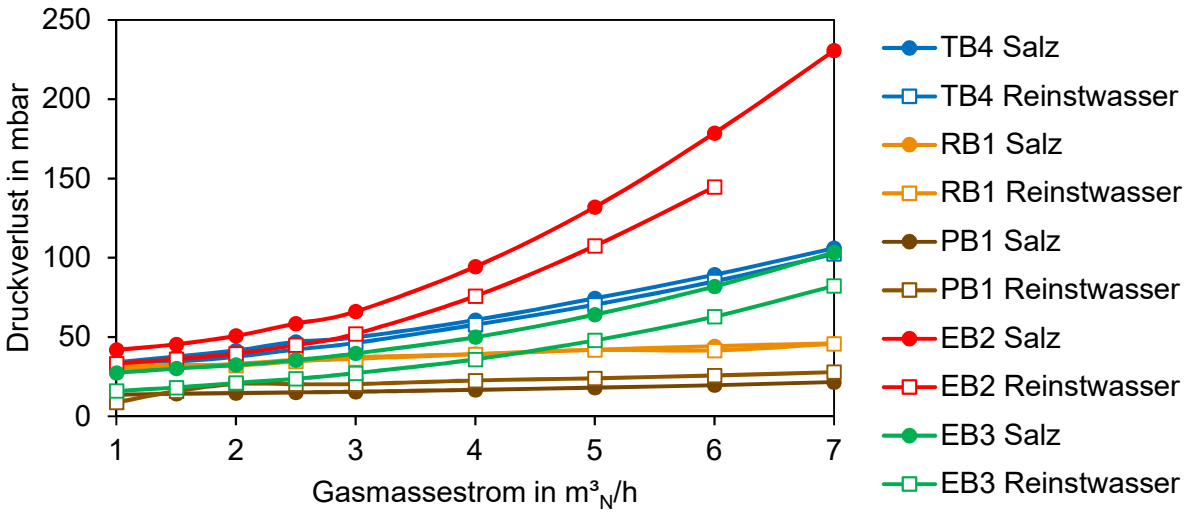


Abbildung 4.7 Gegenüberstellung des Druckverlustes der Belüftungselemente im entionisiertem und salzversetztem Wasser mit $C_{Na_2SO_4} = 0{,}5\ g/l$

### 4.2.3 Sauerstoffeintrag in Belebtschlamm

Für die Versuche mit Belebtschlamm wurde die reduzierte Belüfterauswahl wie schon in den Versuchen in salzversetzen Wasser genutzt. Die Gasmasseströme lagen dabei im Bereich von 1,5 bis 4 $m^3_N/h$ pro Belüfter. Es wurden immer zwei Belüfter parallel in der jeweiligen Säule mit dem Belebtschlamm aus einer Schlammlieferung auf ihren Sauerstoffeintrag untersucht. Die Übersicht dazu ist in Tabelle 3.5 aufgeführt. Für die Edelstahlbelüfter wurde die Anordnung nach Variante 1 gewählt (siehe Abbildung 4.8).

Abbildung 4.8: Edelstahlbelüfter auf Schlitten nach komplettem Durchlauf der Sauerstoffeintragsversuche.

In Abbildung 4.9 sind die Verläufe der Standard-Sauerstoffzufuhr in Reinstwasser und Belebtschlamm über dem Gasmassestrom aufgetragen. Erwartungsgemäß ist die Sauerstoffzufuhr ist unabhängig vom verwendeten Belüftertyp in Schlamm schlechter als in Reinstwasser und damit auch schlechter als in salzversetzen Wasser. Dieses Verhalten kommt durch die verschiedenen Abwasserinhaltsstoffe, Belebtschlammflocken und sonstigen Partikel zustande und ist für Abwasser bekannt. So sind die Abwasserinhaltsstoffe durch ihren Einfluss auf die Oberflächenspannung verantwortlich für eine Veränderung der initialen Blasengröße. Die Blasenkoaleszenz wird im Belebtschlamm sehr stark durch die Belebtschlammflocken und sonstige Partikel beeinflusst. Deshalb ist der α-Wert für belebten Schlamm in der Regel kleiner als 1.

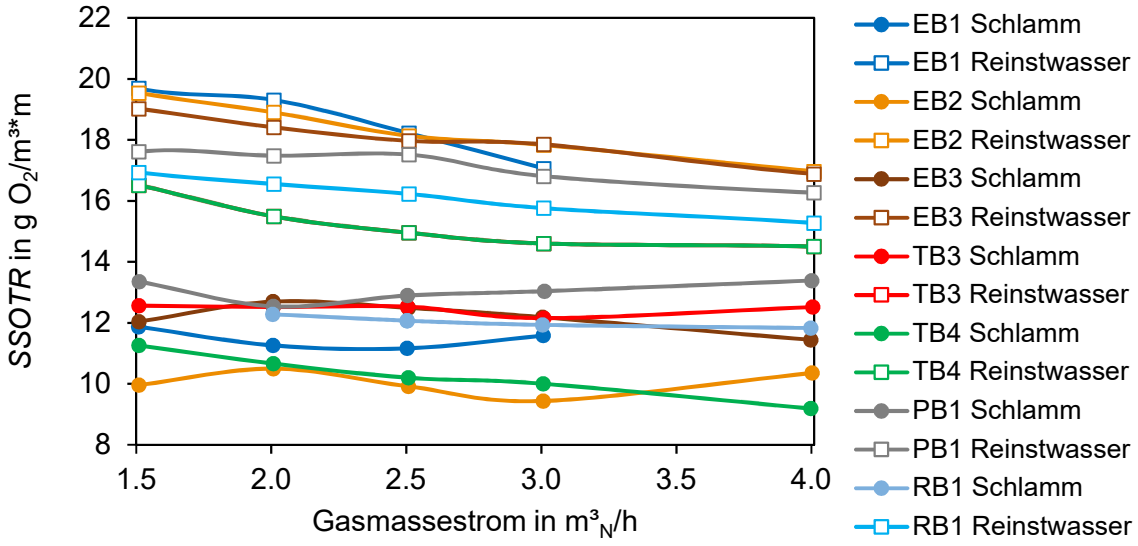


Abbildung 4.9: Vergleich der Standard-Sauerstoffzufuhr in Reinstwasser und Belebtschlamm für ausgewählte Belüfter.

Die Untersuchungen in belebtem Schlamm zeigen weiterhin, dass die Abwasserinhaltsstoffe auch Auswirkungen auf den Druckverlust der Belüfter haben. Für alle Belüfter ist der Druckverlust in Schlamm höher als in Reinstwasser. Auch hier kann die veränderte Oberflächenspannung als Ursache für den gestiegenen Druckverlust angesehen werden.

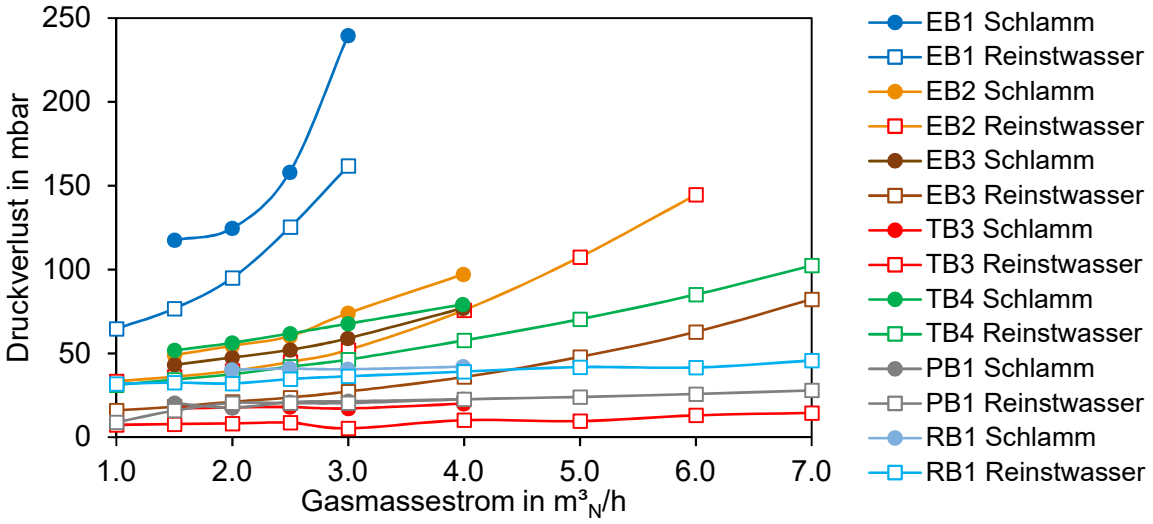


Abbildung 4.10: Vergleich des Druckverlustes von Edelstahl- und Standardbelüftern in Reinstwasser und Belebtschlamm in Abhängigkeit vom Gasmassestrom.

Die Veränderungen von Sauerstoffzufuhr und Druckverlust im Vergleich zu Reinstwasser spiegeln sich auch im Sauerstoffertrag wieder. Dieser ist in Abbildung 4.11 für die untersuchten Belüfter gegenüber dem Gasmassestrom aufgetragen. Je nach Belüftermodell und Gasmassestrom ist der Sauerstoffertrag in Belebtschlamm bis zu 50 % geringer als in Reinstwasser. Im Vergleich zwischen kommerziellen Belüftern und Edelstahlbelüftern können die Edelstahlbelüfter mit 70 µm Lochdurchmesser ihren Vorteil zeigen. Je nach Gasmassestrom sind bis zu 20 % mehr Sauerstoffertrag pro Belüfterfläche erreichbar. Die positiven Ergebnisse der Edelstahlbelüfter mit 30 und 50 µm großen Löchern in Reinstwasser und salzhaltigem Wasser sowie der Videometriemessungen konnten in Belebtschlamm nicht bestätigt werden. Eine plausible Erklärung ist eine durch die höhere Lochdichte von 15 und 29 Löchern pro cm² bei EB1 und EB2 mögliche erhöhte Blasenkoaleszenzrate im Belebtschlamm kurz nach der Ablösung der Blasen vom Belüfter. Infolgedessen verringert sich die an den kleinen Löchern initial gebildete große Grenzflächendichte im Belebtschlamm bereits kurz über dem Belüfter erheblich. Die gebildeten großen Blasen führen dann zu einer reduzierten Sauerstoffausnutzung. Untersuchungen von Behnisch (2018) und Sander et al. (2017) bestätigen diese Schlussfolgerung. Die vergleichsweise geringe Lochdichte von 13 Löchern pro cm² bei EB3 zeigt diesen negativen Effekt nicht.

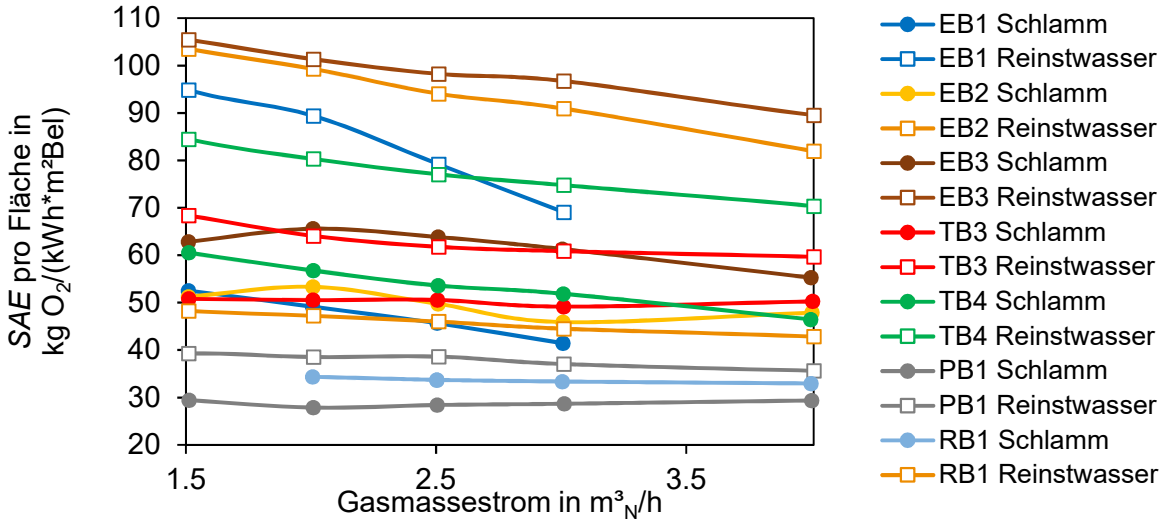


Abbildung 4.11: Vergleich des Sauerstoffertrags von Edelstahl- und Membranbelüftern in Reinstwasser und Belebtschlamm in Abhängigkeit vom Gasmassestrom.

## 4.3 Variation der Einblastiefe

Analog zu den vorhergehenden Untersuchungen sind folgend die Versuchsergebnisse für unterschiedliche Einblastiefen im entionisiertem Wasser und Belebtschlamm aufgeführt. Dargestellt wird die Auswirkung der Einblastiefe, auf die spezifische Standard-Sauerstoffzufuhr, dem Sauerstoffertrag sowie dem Druckverlust bei Gasmassesträmen mit 2 und 3 $m^3_N/h$. Basierend auf den Ergebnissen aus Abschnitt 4.2, wird die getroffene Auswahl der energetisch effektivsten Belüfter betrachtet.

### 4.3.1 Effekt der Einblastiefe in Reinstwasser

Die Ergebnisse der in Abbildung 4.12 dargestellten *SSOTR*-Werte zeigen, dass für die Tellerbelüfter 4, Rohrbelüfter 1, Plattenbelüfter 1 und die Edelstahlbelüfter mit 50 und 70 µm Löchern der *SSOTR*-Wert mit Verringerung der Einblastiefe tendenziell abnimmt.

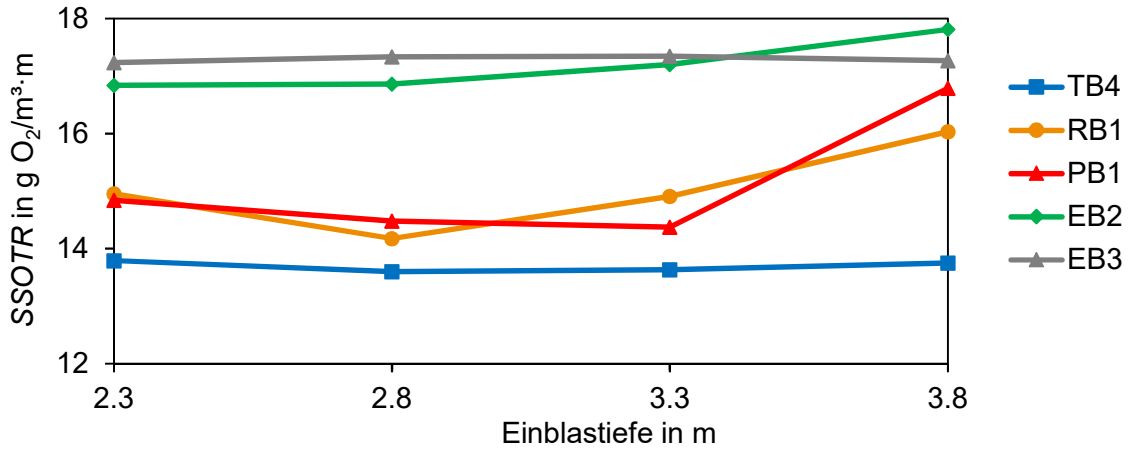


Abbildung 4.12: Verlauf der Spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr in Abhängigkeit der Einblastiefe bei 2 $m^3_N/h$.

Ebenfalls nimmt der Sauerstoffertrag mit Verringerung der Einblastiefe ab. Dessen Verlauf ist in Abbildung 4.13 dargestellt.

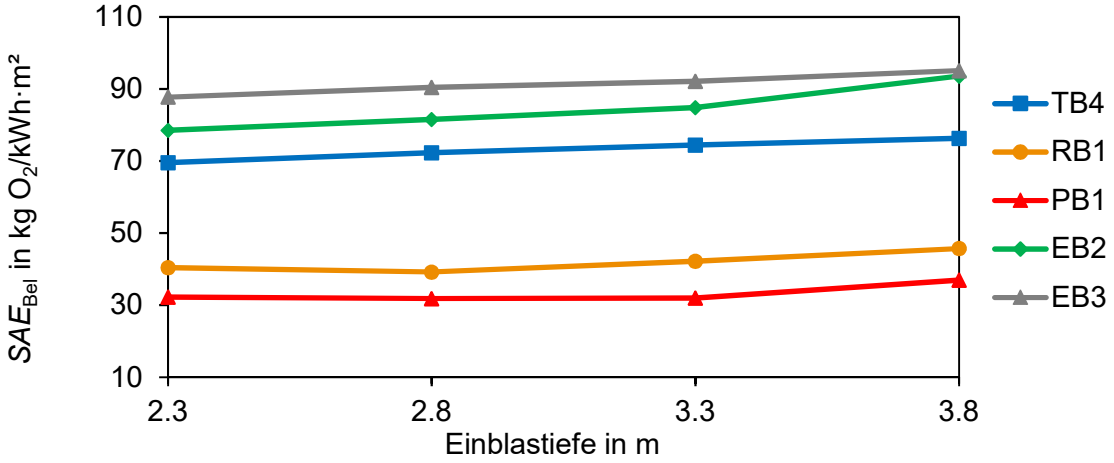


Abbildung 4.13: Verlauf des Sauerstoffertrages in Abhängigkeit der Einblastiefe bei 2 $m^3_N/h$.

### 4.3.2 Effekt der Einblastiefe in Belebtschlamm

In Abbildung 4.14 sind die Standard-Sauerstoffzufuhrwerte für die Belüfter bei 2,8 m Einblastiefe dargestellt. Wie schon aus den Sauerstoffzufuhrmessungen bekannt, liegen auch hier die Werte für die Belebtschlammmessungen niedriger als die im Reinstwasser.

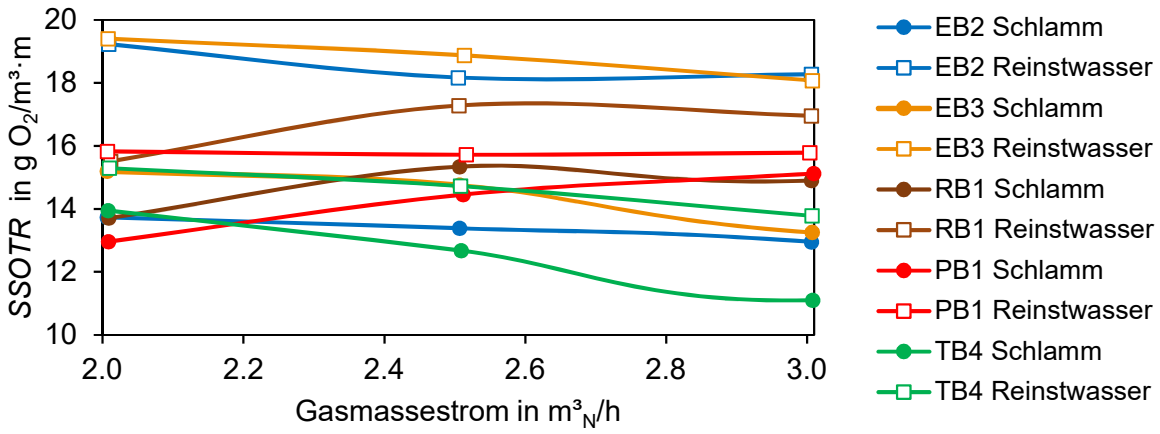


Abbildung 4.14 Spezifische Standardsauerstoffzufuhr bei 2,8 m Einblastiefe im Vergleich zwischen Belüftern in Reinstwasser und Belebtschlamm.

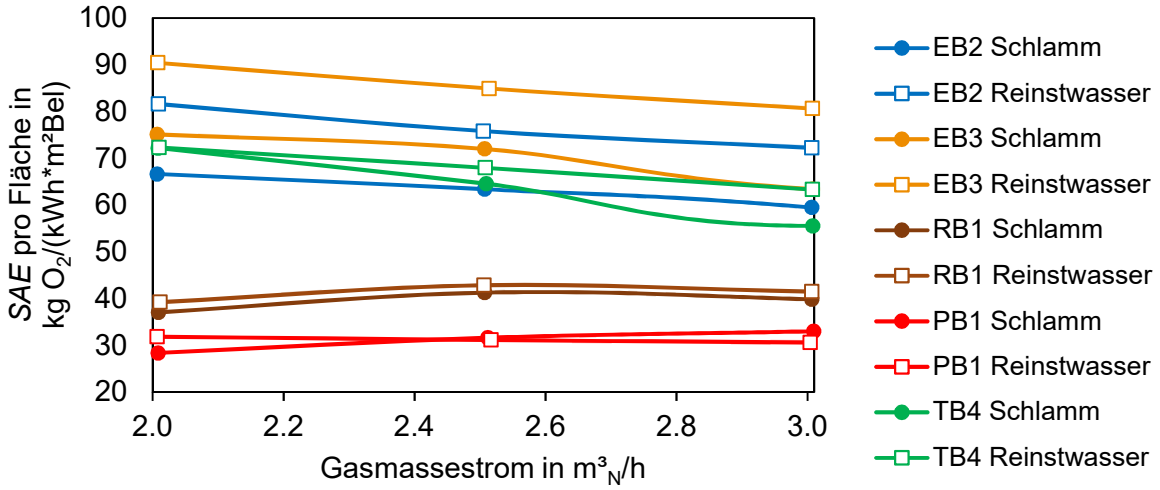


Abbildung 4.15: Standardsauerstoffertrag bei 2,8 m Einblastiefe im Vergleich zwischen Belüftern in Reinstwasser und Belebtschlamm.

Im Verlauf der Messungen mit der verringerten Einblastiefe in Belebtschlamm konnte im unteren Bereich der Technikumsanlage jedoch eine recht starke Sedimentation festgestellt werden. Gerade bei den niedrigeren Gasmassesträmen der Belüfter wurde der Bereich unterhalb der Belüfter nicht mehr ausreichend durchmischt, um die Belebtschlammflocken in der Schwebe zu halten. In Bezug auf den Ammoniumabbau wäre in dem Fall sogar eine verringerte Abbaurate zu erwarten, weil vermutlich viele Mikroorganismen im sedimentierten Schlamm zu wenig Sauerstoff und Nährstoffe für die Abbauprozesse bekommen würden.

Aufgrund der Versuchsergebnisse aus Reinstwasser- und Belebtschlammuntersuchungen mit verringerten Einblastiefen kann keine Empfehlung für die Verringerung der Einblastiefe zur Energieeinsparung gegeben werden.

## 4.4 Reinigungsleistung in belebtem Schlamm

Zur Bewertung der Reinigungsleistung der Belüfter in der Technikumsanlage mit Belebtschlamm wurden insgesamt 8 Belüfterkonfigurationen untersucht. Dazu wurde der geregelte Modus der Versuchsanlage genutzt. Die Sauerstoffkonzentration wurde entsprechend des eingestellten Sollwerts bis zum vollständigen Ammoniumabbau geregelt. Es wurden Versuche mit den Sollwerten von 2 mg/l, 1,5 mg/l und 1 mg/l durchgeführt.

In Abbildung 4.16 ist ein Verlauf der Ammonium- und Nitratkonzentration über den Verlauf des Ammoniumabbaus dargestellt. Die Versuchsdauer variierte zwischen den Versuchstagen. Dies war von der Belebtschlammtemperatur und der tagesaktuellen Belebtschlammzusammensetzung abhängig.

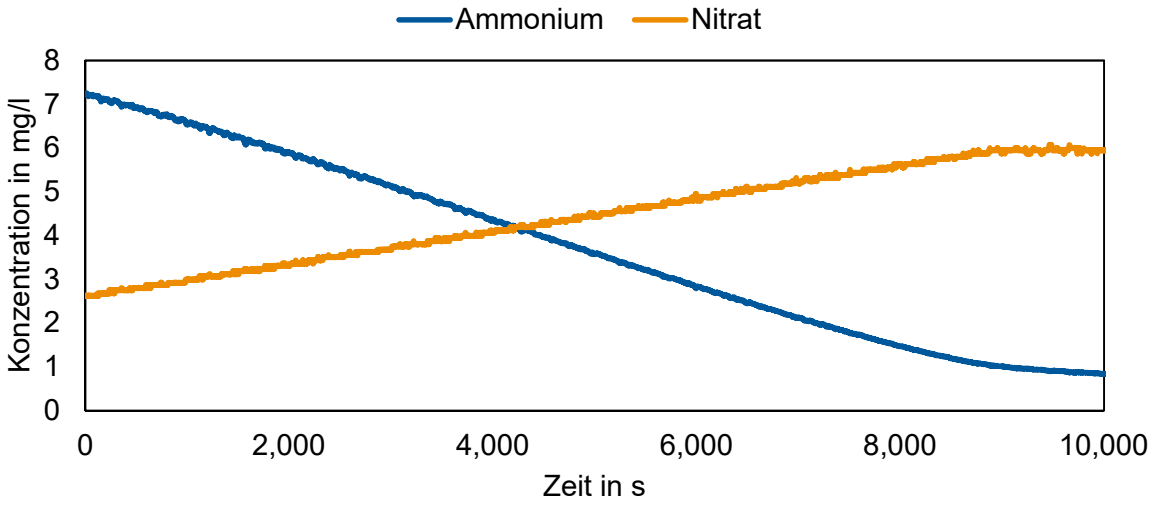


Abbildung 4.16: Konzentrationsverlauf von Ammonium und Nitrat bei einem Abbauversuch in der Technikumsanlage.

Da die Ammoniumkonzentration und gerade zum Ende des Abbauversuchs auch die Abbaurate sank, variierte entsprechend der Regelung der Gasmassestrom während der Versuchszeit. Die Reinigungsleistung gemäß Gleichung (3.5) bezogen auf die Belüfterfläche ist im Diagramm der Abbildung 4.17 dargestellt. Mit einer etwa 13 % höheren Reinigungsleistung im Vergleich zum TB4 erreicht hier der Edelstahlbelüfter mit 70 µm Löchern das beste Ergebnis. Durch die geringe Belüfterfläche schneiden hier die kleineren Belüfter etwas besser ab als beispielsweise der relativ große Plattenbelüfter 1. An den Ergebnissen für den TB4 in einzelner und doppelter Ausführung ist zu erkennen, dass die Reinigungsleistung pro Fläche im untersuchten Rahmen sinkt, wenn

die Belüfterfläche vergrößert wird. Die Ursache dafür ist in den geringen Luftbeaufschlagungen im Regelbetrieb zu finden. Der Luftmassestrom teilt sich dabei auf die beiden Tellerbelüfter auf, wodurch die Membran weniger stark gewölbt wird und somit die Abgasung unregelmäßiger wurde. Somit wurde gezeigt, dass in der Technikumsanlage eine zu hohe Flächenbelegung der Belüfter sich negativ auf die Reinigungsleistung pro Belüfter auswirken kann.

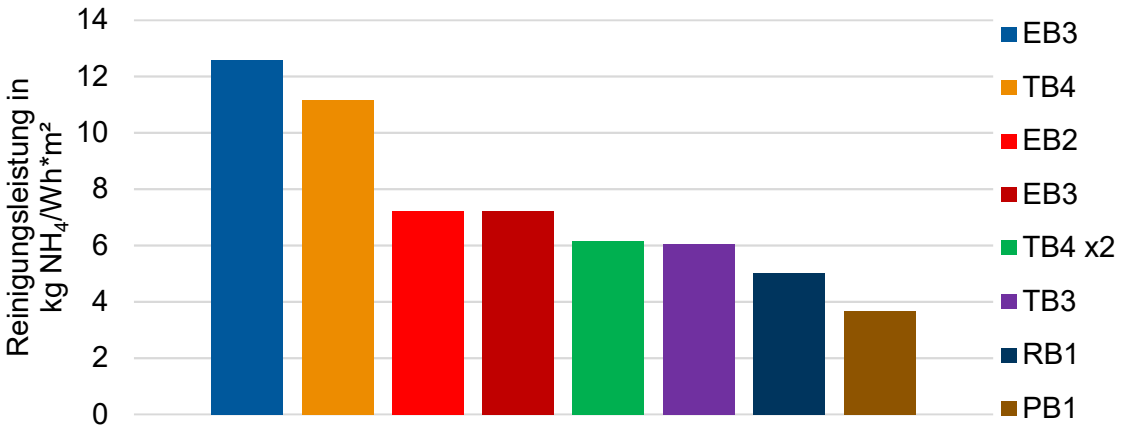


Abbildung 4.17: Vergleich der Reinigungsleistung bezogen auf die Belüfterfläche in Belebtschlamm für verschiedene Belüfter.

Bei Betrachtung von unterschiedlichen Regelungszielen für den Gelöstsauerstoff mit den vier Belüftern die in Abbildung 4.18 dargestellt ist, ist zu erkennen, dass bei geringeren Regelzielen die Reinigungsleistung höher ausfallen kann. Der Effekt ist hier bei den ausgewählten Membranbelüftern gegenüber EB1 und EB2 deutlicher. EB1 und EB2 zeigten jedoch bereits bei der Standard-Sauerstoffzufuhr in Belebtschlamm ein schlechteres Verhalten (siehe Abschnitt 4.2.3). Bei 1 mg/l wurden mit TB4 23 %, TB3 21 % und EB2 8 % höhere Werte der Reinigungsleistung gegenüber 2 mg/l erreicht. Für EB3 konnten die Versuche mit geringeren Sollwerten aus technischen Gründen nicht durchgeführt werden. Ausgehend von der hohen Reinigungsleistung für EB3 bei 2 mg/l ggü. den übrigen Belüftern ist jedoch auch bei geringeren Sollwerten eine höhere Reinigungsleistung zu erwarten.

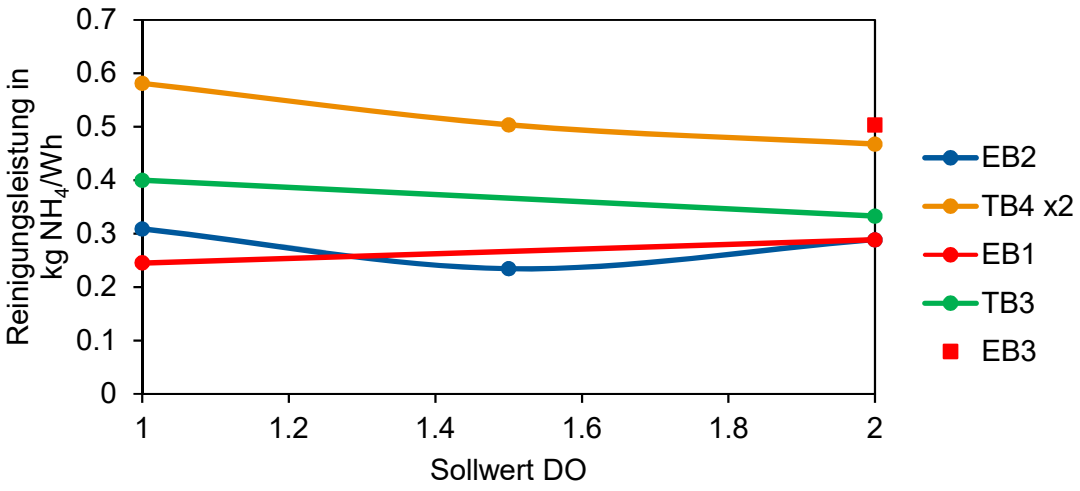


Abbildung 4.18: Vergleich der Reinigungsleistung bei Regelzielen zwischen 1 und 2 mg/l Sauerstoffgehalt in Belebtschlamm für eine Belüfterauswahl.

Die Untersuchungen bezüglich der Reinigungsleistung in Belebtschlamm zeigen, dass der Einsatz von mikroperforierten Edelstahlbelüftern energetische Vorteile gegenüber den kommerziellen Membranbelüftern hat. Dabei spielt die jedoch die Größe der Lochöffnungen und die Lochdichte eine entscheidende Rolle. Die Edelstahlbelüfter mit 70 µm konnten dabei eine 13 % höhere Reinigungsleistung in Bezug auf die Belüfterfläche im Vergleich zum besten Membranbelüfter erzielen. Bei dem Einsatz von Edelstahlbelüftern mit noch kleineren Löchern (EB1 und EB2) in Belebtschlamm konnten die in Reinstwasser und salzhaltigem Wasser erzielten positiven Ergebnisse aufgrund zu hoher Lochdichten nicht reproduziert werden. Bei EB1 und EB2 überlagern in Belebtschlamm sehr wahrscheinlich negative Koaleszenzeffekte der gebildeten Blasen an bzw. über den eng benachbarten Löchern den positiven Effekt der Entstehung feinster Initialblasen. Dies deckt sich mit Beobachtungen von Behnisch (2018).

# 5 Energetische und wirtschaftliche Bilanzierung

Mit den experimentell ermittelten Werten für Reinigungsleistung und Sauerstoffertrag der Edelstahlbelüfter und der kommerziellen Membranbelüftern wurde eine energetische und wirtschaftliche Bilanzierung durchgeführt. Hierfür wurden Referenzwerte für den Energieverbrauch der Belüftung von einer beispielhaften Kläranlage der Größenklasse 4 (50000 EW) in NRW genutzt. Die Beispielskläranlage ist mit Belüftern vom Typ Plattenbelüfter 1 ausgestattet. Ausgehend vom Energiebedarf des Plattenbelüfters wurden die energetischen Vorteile des Edelstahlbelüfters mit 70 µm Lochgröße, des TB4 und des RB1 in Bezug auf Reinigungsleistung und Sauerstoffertrag eingerechnet. So ist beispielsweise der Sauerstoffertrag pro Belüfterfläche der Edelstahlbelüfter mehr als doppelt so hoch als beim Plattenbelüfter bzw. ist bei der Reinigungsleistung pro Belüfterfläche eine Steigerung um 240 % erreicht worden. Um die Verbesserung direkt übertragen zu können, wurde die Anzahl der Belüfter so gewählt, dass alle Belüfter die gleiche aktive Membranfläche haben. Diese beträgt 233,6 m³ für die Beispielkläranlage. In Tabelle 5.1 sind die daraus resultierenden Belüftteranzahlen, die jeweiligen Werte für Sauerstoffertrag und Reinigungsleistung und deren prozentuale Änderungen aufgeführt.

Tabelle 5.1: Zusammenstellung der Belüfter für die Wirtschaftlichkeitsanalyse mit deren Steigerung in $SAE_{Bel}$ und Reinigungsleistung.

| | Plattenbelüfter 1 | Edelstahl 70 µm | Tellerbelüfter 4 | Rohrbelüfter 1 |
|---|---|---|---|---|
| Aktive Belüfterfläche [m²] | 0,1 | 0,04 | 0,038 | 0,075 |
| Resultierende Belüfteranzahl | 2336 | 5840 | 6147 | 3115 |
| $SAE_{Bel}$ [kg $O_2$/(kWh*m² Bel)] | 28,76 | 61,77 (+ 115 %) | 53,86 (+ 87 %) | 33,63 (+17 %) |
| Reinigungsleistung [kg $NH_4$/Wh*m²] | 3,65 | 12,60 (+ 240 %) | 11,15 (+ 205 %) | 5,02 (+ 36 %) |

## 5.1 Energieersparnisanalyse

Zunächst werden die Energieeinsparungen in Bezug auf die $SAE_{Bel}$-Verbesserung der Belüfter im Vergleich zum Plattenbelüfter betrachtet. Diese sind in Tabelle 5.2 aufgeführt. Der Energieverbrauch für den Teilbereich Belüftung wurde verändert und Rührwerke sowie Pumpen wie im Referenzzustand beibehalten. Dabei ist zu erkennen, dass der Energieverbrauch pro Einwohnerwert bei den Edelstahlbelüftern am geringsten ist. Eine Verbesserung von etwa 44 % im Vergleich zum PB1 ist in diesem Fall möglich. Die TB4 liegen knapp darüber und die Rohrbelüfter näher an den Plattenbelüftern. Diese Energieeinsparung spiegelt sich auch in der Einsparung von bis 233,3 t CO2 pro Jahr wieder.

Tabelle 5.2: Energieverbrauch und Einsparungen anhand der $SAE_{Bel}$-Verbesserung im Vergleich zum Plattenbelüfter 1.

| | **PB1 [kWh/a]** | **EB3 [kWh/a]** | **TB4 [kWh/a]** | **RB1[kWh/a]** |
|---|---|---|---|---|
| Belüftung | 638.689 | 297.065 | 341.545 | 545.888 |
| Rührwerke | 70.080 | 70.080 | 70.080 | 70.080 |
| Rezirkulationspumpen | 20.228 | 20.228 | 20.228 | 20.228 |
| Rücklaufschlammpumpen | 48.632 | 48.632 | 48.632 | 48.632 |
| Summe | 777.629 | 436.005 | 480.485 | 684.828 |
| eBel [kWh/(E a)] | 17,4 | 9,8 | 10,8 | 15,3 |
| Energieeinsparung [kWh/a] | | 341624 | 297144 | 92801 |
| Energieeinsparung [%] | | 43,9 | 38,2 | 11,9 |
| CO2-Emission [t/a] | 416,0 | 233,3 | 257,1 | 366,4 |
| Einsparung CO2-Emission [t/a] | | 183 | 159 | 50 |
| Einsparung CO2-Emission [%] | | 43,9 | 38,2 | 11,9 |

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Betrachtung der Energieeinsparungen in Bezug auf die Verbesserung der Reinigungsleistung der Belüfter im Vergleich zum Plattenbelüfter 1 (Tabelle 5.3). Da hier die Energieeinsparung im Bereich der Belüftung noch größer ist als bei den Berechnungen, die auf den $SAE_{Bel}$-Werten basieren, sinkt der Anteil der Belüftung am Gesamtverbrauch der Belebungsanlage. Die Einsparungen von Edelstahlbelüftern und den Tellerbelüftern liegen daher mit 58 und 55,2 % näher zusammen.

Tabelle 5.3: Energieverbrauch und Einsparungen anhand der Reinigungsleistungsverbesserung im Vergleich zum Plattenbelüfter 1.

| | **PB1 [kWh/a]** | **EB3 [kWh/a]** | **TB4[kWh/a]** | **RB1 [kWh/a]** |
|---|---|---|---|---|
| Belüftung | 638.689 | 187.850 | 209.406 | 469.624 |
| Rührwerke | 70.080 | 70.080 | 70.080 | 70.080 |
| Rezirkulationspumpen | 20.228 | 20.228 | 20.228 | 20.228 |
| Rücklaufschlammpumpen | 48.632 | 48.632 | 48.632 | 48.632 |
| Summe | 777.629 | 326.790 | 348.346 | 608.564 |
| eBel [kWh/(E a)] | 17,4 | 7,3 | 7,8 | 13,6 |
| Energieeinsparung [kWh/a] | | 450.839 | 429.283 | 169.065 |
| Energieeinsparung [%] | | 58,0 | 55,2 | 21,7 |
| CO2-Emission [t/a] | 416,0 | 174,8 | 186,4 | 325,6 |
| Einsparung CO2-Emission [t/a] | | 241 | 230 | 90 |
| Einsparung CO2-Emission [%] | | 58,0 | 55,2 | 21,7 |

## 5.2 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Ausgehend von den Energieeinsparungen und den ermittelten Belüfteranzahlen wurde eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt. Dazu wurden die Investitions- und Betriebskosten für die jeweiligen Belüfterkonfigurationen ermittelt. Auf eine Anpassung des Kompressors für die Druckluftbereitstellung wurde hier jedoch verzichtet. Die Investitionskosten für den Kompressor sind in den Berechnungen nicht enthalten. Aus den ermittelten Mehrinvestitionen im Vergleich zum Referenzfall mit den Plattenbelüfter 1 und dem Energiebedarf für die Fälle $SAE_{Bel}$-Verbesserung und Reinigungsleistungsverbesserung wurden Amortisationszeiten bestimmt. Unter Beachtung von Energiepreisen für Verbraucher und für Industrie sind für den jeweiligen Fall zwei Amortisationszeiten berechnet worden. In Tabelle 5.4 befinden sich die zusammengefassten Daten der Berechnungen. Die vollständige Berechnungstabelle befindet sich im Abschlussbericht. Die Investitionskosten für die Edelstahlbelüfter mit einer aktiven Belüfterfläche von 0,04 m² wurde mit 35 € pro Belüfter relativ hoch angesetzt, weil die Belüfter in der derzeitigen Bauform aufwändig in der Fertigung sind und dadurch pro Belüfterfläche derzeit preislich noch nicht so attraktiv wie die kommerziellen Belüfter sind. Dadurch ergeben sich für die Edelstahlbelüfter die höchsten Investitionskosten. Doch für alle Belüfter ist eine Amortisation in weniger als 5 Jahren möglich. Die Konfiguration mit Rohrbelüftern ist für den Referenzfall sogar günstiger als die Plattenbelüfter, sodass diese Investition am schnellsten amortisiert wäre. Bei den anderen Belüftern ist die Amortisationszeit von der betrachteten Energieeinsparung abhängig. Bei Betrach-

tung der Sauerstoffertragsverbesserung ist eine Amortisation nach 2,6 und bei Reinigungsleistungsverbesserung sogar schon nach 1,9 Jahren mit Industrieverbraucherpreisen möglich. Nach Optimierungen in der Bauform der Edelstahlbelüfter bzw. Optimierungen in der Fertigung, welche zu Investitionseinsparungen führen, wäre eine schnellere Amortisation möglich. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse zeigt, dass ein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist und die Energieeinsparung auch zu einer Gesamtkosteneinsparung führen kann. Dafür ist es erforderlich, dass die Edelstahlbelüfter auch über lange Zeiträume wartungsfrei arbeiten können. Dies wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.

Tabelle 5.4: Amortisationszeiten für verschiedene Belüfter. Berechnet nach $SAE_{Bel}$- bzw. Reinigungsleistungsverbesserung.

| | | **PB1** | **EB3** | **TB4** | **RB1** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Investition Belüftung** | | | | | |
| Investition Belüfter | €/Stk. | 35 | 35 | 25 | 25 |
| Investition netto | € | 93.440 | 210.240 | 165.364 | 89.547 |
| Mehrinvestition | € | | 131.400 | 80.915 | -4380.00 |
| | | *SAE*-Verbesserung | | | |
| Energieverbrauch Belüftung | kWh/a | 638.689 | 297.064 | 341.544 | 545.888 |
| Energieeinsparung | kWh/a | | 341,624 | 297,144 | 92,801 |
| Energiepreis 1 Industrie | €/kWh | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 |
| Energiepreis 2 Verbraucher | €/kWh | 0,275 | 0,275 | 0,275 | 0,275 |
| Kosteneinsparung 1 | €/a | | 51.244 | 44.572 | 13.920 |
| Kosteneinsparung 2 | €/a | | 93.947 | 81.715 | 25.520 |
| Kosteneinsparung 1 | € | | 256.218 | 222.858 | 69.601 |
| Kosteneinsparung 2 | € | | 469.733 | 408.573 | 127.601 |
| Amortisationszeit 1 | a | | 2,6 | 1,8 | -0,3 |
| Amortisationszeit 2 | a | | 1,4 | 1,0 | -0,2 |
| | | Reinigungsleistungsverbesserung | | | |
| Energieverbrauch Belüftung | kWh/a | 638.689 | 187.849 | 209.406 | 469.624 |
| Energieeinsparung | kWh/a | | 450.839 | 429.283 | 169.065 |
| Energiepreis 1 Industrie | €/kWh | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 |
| Energiepreis 2 Verbraucher | €/kWh | 0,275 | 0,275 | 0,275 | 0,275 |
| Kosteneinsparung 1 | €/a | | 67.626 | 64.392 | 25.360 |
| Kosteneinsparung 2 | €/a | | 123.981 | 118.053 | 46.493 |
| Kosteneinsparung 1 | € | | 338.129 | 321.962 | 126.799 |
| Kosteneinsparung 2 | € | | 619.904 | 590.264 | 232.464 |
| Amortisationszeit 1 | a | | 1,9 | 1,3 | -0,2 |
| Amortisationszeit 2 | a | | 1,1 | 0,7 | -0,1 |

# 6 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Forschungsarbeit war der Vergleich von Belüftern mit starren Öffnungen im Mikrometerbereich, basierend auf der Idee des Kanülenbegasers, mit dem Stand der Technik in Bezug auf die Sauerstoffeintragseffizienz und die Potenziale zur Energieeinsparung. Es wurden zunächst grundlegende Untersuchungen auf Basis der Videometrie zur initialen Blasengröße von starren Öffnungen durchgeführt, um die optimale Konfiguration für Blasen nahe dem idealen Blasendurchmesser zu finden. Weiterhin wurden in einer Technikumsanlage großskalige Untersuchungen mit Edelstahlbelüftern und kommerziell erhältlichen Membranbelüftern zur Sauerstoffzufuhr in Reinstwasser, salzhaltigem Wasser und Belebtschlamm durchgeführt.

Bei den videometrischen Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass mit den Kanülen bzw. starren Lochöffnungen die Bildung von im Vergleich zu den Membranbelüftern substantiell feineren Blasen mit einem mittleren Sauterdurchmesser von ca. 1,5 mm möglich ist. Bezogen auf die Blasengröße und Druckverlust zeigen die Lochplatten mit 50 µm Öffnungsdurchmesser die besten Ergebnisse.

In der Technikumsanlage wurde die Sauerstoffzufuhr in Reinstwasser mit einer Einblastiefe von bis zu 4 m bestimmt. Im Vergleich mit konventionellen Teller-, Rohr- und Plattenbelüftern haben die Edelstahlbelüfter im Bereich von 1 bis 7 $m^3_N/h$ höhere SSOTR-Werte in Reinstwasser erzielt. Trotz des teilweise höheren Druckverlusts erreichen die Edelstahlbelüfter im Vergleich über einen weiten Bereich der untersuchten Gasmasseströme die besten Werte beim Sauerstoffertrag in Reinstwasser. Eine Reduktion des Druckverlustes für vergleichbare Gasmasseströme ist durch eine angepasste Auslegung des Belüftungssystems – Anpassung der aktiven Fläche – mit einem höheren Materialaufwand für EB gegenüber konventionellen Belüftern erreichbar.

Die effizientesten Belüfter der jeweiligen Bauformen sowie alle Edelstahlbelüfter wurden danach in salzhaltigen Wasser und in Belebtschlamm bezüglich ihrer Sauerstoffzufuhr und Sauerstoffertrag untersucht. Wobei der höhere Sauerstoffertrag der Edelstahlbelüfter bestätigt werden konnte. Mindestens 20 % höhere $SAE_{Bel}$-Werte als bei konventionellen Membranbelüftern wurden erreicht. In salzhaltigem Wasser sind erwartungsgemäß für alle Belüfter die Sauerstoffzufuhrwerte höher als in Reinstwasser, da das Salz koaleszenzhemmend wirkt und die Oberflächenspannung erhöht. Das Verhalten in Belebtschlamm ist ähnlich, wobei nur der Edelstahlbelüfter mit 70 µm großen Lochöffnungen im Sauerstoffertrag über dem besten Membranbelüfter im Ver-

gleich liegt. Die $SAE_{Bel}$-Werte der Edelstahlbelüfter mit 30 und 50 µm liegen im Belebtschlamm im Bereich konventioneller Membranbelüfter. Dies ist vermutlich auf die Abwasserinhaltsstoffe zurückzuführen, die bei den vergleichsweise hohen Lochdichten, die für die Edelstahlbelüfter mit den kleinsten Lochöffnungen gewählt wurden, zu einer erhöhten Blasenkoaleszenzrate und damit einer reduzierten Sauerstoffausnutzung führen.

In Belebtschlamm wurde die Reinigungsleistung der Belüfter bestimmt. Dazu wurde der Belebtschlamm vollständig nitrifiziert und die benötigte Luft bzw. der Energiebedarf pro Kilogramm abgebauten Ammonium bestimmt. Dabei erzielten die Edelstahlbelüfter mit 70 µm Lochöffnungen das beste Ergebnis. Bei der Betrachtung der benötigten Luft pro abgebauter Ammoniummasse, erzielen die Edelstahlbelüfter mit 30 und 50 µm Löchern durch die ungünstige Lochdichte und den damit verbundenen Blasenkoaleszenzeffekt geringere Werte. Bezogen auf die aktive Belüfterfläche hat der Edelstahlbelüfter mit 70 µm Lochöffnungen eine 13 % höhere Reinigungsleistung gegenüber den Membranbelüftern. Damit wurde gezeigt, dass mit den Edelstahlbelüftern eine effizientere Belüftung von Belebtschlamm möglich ist.

Bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse mittels Referenzdaten einer beispielhaften Kläranlage wurde festgestellt, dass eine Amortisation der Edelstahlbelüfter innerhalb von 1,1 bis 2,6 Jahren möglich ist. Dazu wurden die Verbesserung der Sauerstoffzufuhr und der Reinigungsleistung genutzt.

Die hohen Kosten für die Edelstahlbelüfter in der derzeitigen Bauform sind ein Hindernis für den großflächigen Einsatz. Eine kostenoptimierte Fertigung würde die Amortisationszeiten der Edelstahlbelüfter deutlich verkürzen. Jedoch ist vor Einsatz der Edelstahlbelüfter in einem Belebungsbecken noch eine Analyse der Langzeitstabilität auch hinsichtlich von betrieblichen Erfahrungen wie Belegen oder ähnlichem notwendig. Derzeit ist unklar wie sich die starren Lochöffnungen in Belebtschlamm nach längeren Betriebszeiten verhalten. Es ist zu untersuchen, in welchem Maße Verstopfungs- bzw. Foulingeffekte eine Rolle spielen und wie stark sich die Sauerstoffzufuhr und Reinigungsleistung verändert. Möglicherweise ist eine Optimierung der Belüfter mit starren Lochöffnungen notwendig, um diese Effekte zu minimieren. Nach Langzeituntersuchungen mit positiven Ergebnissen ist dann ein Einsatz in realen Belebungsbecken denkbar. Ein weiteres Einsatzgebiet ergibt sich aufgrund des besseren Einblasverhaltens auch im Bereich der nachgeschalteten 4. Reinigungsstufe als Ozondiffusor, worüber es aber noch keine Erkenntnisse gibt.

# 7 Literaturverzeichnis


Aktita, K; Yoshida, F. 1973. Gas hold up and volumetric mass transfer coefficient in bubble columns. Effect of liquid properties. Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop., Vol. 12, No. 1.

ATV-Handbuch. 1997. Biologische und weitergehende Abwasserreinigung. 4. Auflage Abwassertechnische Vereinigung e.V. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin. ISBN 3-433-01462-0.

Behnisch, J., Ganzauge, A., Sander, S., Herrling, M. P., & Wagner, M. 2018. Improving aeration systems in saline water: measurement of local bubble size and volumetric mass transfer coefficient of conventional membrane diffusers. *Water Science and Technology*, *78*(4), 860-867.

Beyersdorf, J. 1997. Verhalten von Luftblasen und Sedimenten in Blasensäulen in Abhängigkeit vom Salzgehalt im Wasser. Mitteilungen Heft 79, Universität Hannover, ISSN 0340-0077.

BDEW. 2017.BDEW-Strompreisanalyse Februar 2017- Haushalte und Industrie. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Berlin.

BMWi. 2014. Mehr aus Energie machen – Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin.

DIN EN 12255-15.2004. Kläranlagen – Teil 15: Messung der Sauerstoffzufuhr in Reinwasser in Belüftungsbecken von Belebungsanlagen. Deutsche Fassung EN 12255-15:2003.

DIN EN 25814:1992-11. Wasserbeschaffenheit. Bestimmung des gelösten Sauerstoffs, Elektrochemisches-Verfahren. (ISO 5814:1990). Deutsche Fassung EN 25814:1992

DWA-M 209. 2007. Messung der Sauerstoffzufuhr von Belüftungseinrichtungen in Belebungsanlagen in Reinwasser und in belebten Schlamm. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. ISBN 978-3-939057-78-9.

DWA-A 216. 2015. Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. ISBN 978-3-88721-276-6.

DWA-M 229-1. 2013. Systeme zur Belüftung und Durchmischung von Belebungsanlagen – Teil 1: Planung, Ausschreibung und Ausführung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. ISBN 978-3-942964-86-9.

DWA-M 229-2. 2016. Systeme zur Belüftung und Durchmischung von Belebungsanlagen – Teil 2: Betrieb. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. ISBN 978-3-88721-325-1.

Frey, W. 1996. Ein Beitrag zur Charakterisierung von Belüftungssystemen für die biologische Abwasserreinigung nach dem Belebungsverfahren mit Sauerstoffzufuhrmessungen. Wiener Mitteilungen Band 134, Techn. Universität Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft. ISBN 3-85234-025-9.

Fricke, K. 2009. Energieeffizienz kommunaler Kläranlagen. *Umweltbundesamt Deutschland: Dessau-Roßlau*.

Gujer, W. 2007. Siedlungswasserwirtschaft. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg. ISBN 978-3-540-34330-1.

Hasanen, A., Orivuori, P., & Aittamaa, J. 2006. Measurements of local bubble size distributions from various flexible membrane diffusers. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 45(4), 291-302.

Higbie, R. 1935. The rate of absorption of a pure gas into a still liquid during short periods of exposure. American Institute of Chemical Engineers, 13-15, S. 365 ff.

Loubière, K., & Hébrard, G. 2003. Bubble formation from a flexible hole submerged in an inviscid liquid. Chemical Engineering Science, 58(1), 135-148.

Müller, H. 1989. Der Einfluß der Wassertiefe von Belebungsbecken auf den Sauerstoffeintrag und die Sauerstoffausnutzung. Schriftreihe WAR, Nr. 37, Techn. Hochschule Darmstadt.

MKUNLV, N. 2014. Entwicklung und Stand der Abwasserbeseitigung in Nordrhein-Westfalen. *Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen*, *17*.

Motarjemi, M., & Jameson, G. J. 1978. Mass transfer from very small bubbles—the optimum bubble size for aeration. Chemical Engineering Science, 33(11), 1415-1423.

Pöpel, J. 1985. Grundlagen zur Optimierung der Belüftung und Energieeinsparung. In: Schriftreihe WAR Band 23 Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts für Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung der Technischen Hochschule Darmstadt e.V., ISBN 3-923419-16-3.

Pöpel, J; Wagner, M, Weidmann, F.1998. Sauerstoffeintrag und –ertrag in tiefen Belebungsbecken. Schriftreihe WAR, Nr. 4, Techn. Hochschule Darmstadt.

Pöpel, J.; Wagner, M. 1994. Theorie und Praxis von Sauerstoffeintrag und –ertrag in tiefen Belebungsbecken. In: 5. Hannoversche Industrieabwassertagung. Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover. Heft 87, ISBN 3-921421-16-0.

Sander, S., Behnisch, J., & Wagner, M. 2017. Design of fine-bubble aeration systems for municipal WWTPs with high sea salt concentrations. *Water Science and Technology*, 75 (7), 1555-1563.

Sommer, A. E., Wagner, M., Reinecke, S. F., Bieberle, M., Barthel, F., & Hampel, U. 2017. Analysis of activated sludge aerated by membrane and monolithic spargers with ultrafast X-ray tomography. Flow Measurement and Instrumentation, 53, 18-27.

Steinmetz, H. 1996. Einfluss von Abwasserinhaltsstoffen, Stoffwechselprozessen und Betriebsparametern von Belebungsanlagen auf den Sauerstoffeintrag in Abwasser-Belebtschlamm-Gemische. Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft, Univ.

Thiersch, B. 2001. Der Zusammenhang von Strömungsstrukturen und Sauerstoffeintrag bei druckbelüfteten Belebungsbecken. Mitteilung Nr. 6, Lehrstuhl für Hydraulik und Gewässerkunde, Techn. Universität München, ISSN 0343-1177.

Triebel, W. 1985. Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik: Biologisch-chemische und weitergehende Abwasserreinigung. Abwassertechnische Vereinigung, 3. Aufl. Berlin: Ernst, Wilhelm & Sohn, ISBN 3-433-00905-8.

Umweltbundesamt. 2009. Energieeffizienz kommunaler Kläranlagen. Umweltbundesamt für Mensch und Umwelt, Dessau-Roßlau.

Wagner, J. 2002. Optimierung von Druckbelüftungssystemen in der Abwasserbehandlung. Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover (vormals Technische Hochschule); Bd. 122. Hannover: Univ., Inst. für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik.

Wagner, M. 1991. Einfluß oberflächenaktiver Substanzen auf Stoffaustausch-mechanismen und Sauerstoffeintrag. Bibliothek des Inst. für WAR.

Zlokarnik, M. 1980. Koaleszenzphänomene im System gasförmig/flüssig und deren Einfluß auf den O2-Eintrag bei der biologischen Abwasserreinigung. Korrespondenz Abwasser, 27. Jg., Nr. 11, S. 728 – 734.

HZDR
HELMHOLTZ ZENTRUM DRESDEN ROSSENDORF

Bautzner Landstr. 400
01328 Dresden, Germany
Tel. +49 351 260-2318
Fax +49 351 260-12318
u.hampel@hzdr.de
http://www.hzdr.de