

STEIGERUNG DER ENERGIEEFFIZIENZ BEI DER BIOLOGISCHEN ABWASSERREINIGUNG DURCH DEN EINSATZ VON KANÜLENBEGA- SERN 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



ABSCHLUSSBERICHT

hzdr

 HELMHOLTZ
ZENTRUM DRESDEN
ROSSENDORF

1. Berichtsart Abschlussbericht			
2. Titel Steigerung der Energieeffizienz bei der biologischen Abwasserreinigung durch den Einsatz von Kanülen- begasern mit dem Ziel eines nachhaltigen Gewässer- und Klimaschutzes (SEBAK)			
3. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Herrmann-Heber, Robert Kutschke, Sabine Reinecke, Sebastian Hampel, Uwe		4. Abschlussdatum des Vorhabens 28.02.2018	5. Förderkennzeichen 17-04.02.01-9a/2014
6. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) Institut für Fluidodynamik Abteilung für experimentelle Thermofluidynamik Postfach 510119 01314 Dresden			
7. Fördernde Institution (Name, Adresse) 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 Begaskonzept 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 Sauerstofftrag 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 Sauerstoffträge 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 Gasmasseströme ist durch eine angepasste Auslegung des Belüftungssystems mit einem höheren Materialaufwand gegenüber konventionellen Belüftern erreichbar. Im Sauerstofftrag 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 Sauerstofftrag. 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 Sauerstofftrages 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 baufornbedingten 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	16
2	Stand von Wissenschaft und Technik	18
2.1	Biologische Abwasserbehandlung	18
2.1.1	Belebtschlammprozess	18
2.1.2	Aktuelle Druckbelüftungssysteme	19
2.1.3	Materialien feinblasiger Druckbelüftungselemente	20
2.1.4	Belüfter mit Mikrometeröffnungen	21
2.2	Bestimmung und Bewertung des Sauerstoffeintrages	23
2.2.1	Grundlagen der Absorptionsmethode	23
2.2.2	Parameter zur Beschreibung des Sauerstoffeintrages	24
2.2.3	Einflüsse auf die Sauerstoffzufuhr	26
2.3	Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Belüftungssystemen	27
3	Material und Methoden	30
3.1	Untersuchung von Einzelblasen und deren Initialverteilung	30
3.1.1	Videometrieversuchsstand	30
3.1.2	Verwendete Kanülen und Lochplatten	31
3.1.3	Auswertung der Videometriemessung	33
3.2	Experimente im Technikumsmaßstab	34
3.2.1	Versuchsaufbau der Technikumsanlage	35
3.2.2	Auswahl der Belüfter und Betriebsbedingungen	36
3.2.3	Durchführung der Absorptionsversuche	38
3.2.4	Auswertung der Absorptionsversuche	40
3.2.5	Durchführung der Reinigungseffizienzversuche	40
3.2.6	Bestimmung der Reinigungseffizienz mit belebtem Schlamm	42
4	Ergebnisse und Auswertung	44
4.1	Videometrieuntersuchungen von Einzelblasen	44
4.1.1	Einzelkanülen	44
4.1.2	Einzellöcher und Lochplatten	48
4.1.3	Vergleich und Fazit	52
4.2	Sauerstoffeintrag	54
4.2.1	Sauerstoffeintrag in Reinstwasser	54
4.2.1.1	Tellerbelüfter	54
4.2.1.2	Rohrbelüfter	59
4.2.1.3	Platten- und Edelstahlbelüfter	60
4.2.2	Sauerstoffeintrag in salzhaltiges Wasser	64
4.2.3	Sauerstoffeintrag in Belebtschlamm	66
4.3	Variation der Einblastiefe	69
4.3.1	Effekt der Einblastiefe in Reinstwasser	70
4.3.2	Effekt der Einblastiefe in Belebtschlamm	73

4.4	Reinigungsleistung in belebtem Schlamm.....	76
5	Energetische und wirtschaftliche Bilanzierung	80
5.1	Energieersparnisanalyse.....	81
5.2	Wirtschaftlichkeitsanalyse	82
6	Zusammenfassung und Ausblick	84
7	Literaturverzeichnis	87
8	Anhang.....	90

Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
a	m^2	Spezifische Grenzfläche
A_{BB}	m^2	Grundfläche des Belebungsbeckens
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
$C_{S,20}$	$mg\ O_2/l$	Normierter Versuchs-Sauerstoffsättigungswert in Reinwasser ($T = 20\ ^\circ C, p = 1013\ hPa$)
$C_{S,p^*,T}$	$mg\ O_2/l$	Temperaturabhängiger Versuchs-Sauerstoffsättigungswert in Reinwasser
$C_{S,St,20}$	$mg\ O_2/l$	Normierter Standard-Sauerstoffsättigungswert ($T = 20\ ^\circ C, p =$ $1013\ hPa$)
$C_{S,St,T}$	$mg\ O_2/l$	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	mws	Druckverlust

k_L	m/s	Stoffaustauschkoeffizient in der flüssigen Phase
k_L	m/h	Stoffaustauschkoeffizient in der flüssigen Phase
k_{La}	h^{-1}	Belüftungskoeffizient
k_{La20}	h^{-1}	Normierter Belüftungskoeffizient für Reinwasser ($T = 20\text{ °C}$)
k_{LaT}	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/m ³ h	Sauerstoffverbrauch des belebten Schlamms
P	Wh/m ³	Belüfterleistung
Δp	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 ($T = 25\text{ °C}$, $p = 1013\text{ hPa}$)
SAE	kg O ₂ /kWh	Standard-Sauerstofftrag für Reinwasser ($T = 20\text{ °C}$, $p = 1013\text{ hPa}$, $C_s = 0\text{ mg/l}$)
SAE_{Bel}	kg O ₂ /kWh ·m ²	Standard-Sauerstofftrag pro Abgasfläche für Reinwasser ($T = 20\text{ °C}$, $p = 1013\text{ hPa}$, $C_s = 0\text{ mg/l}$)
$SOTR$	kg O ₂ /h	Standard-Sauerstoffzufuhr für Reinwasser ($T = 20\text{ °C}$, $p = 1013\text{ hPa}$, $C_s = 0\text{ mg/l}$)
$SSOTE$	%/m	Spezifische Standard-Sauerstoffausnutzung für Reinwasser ($T = 20\text{ °C}$, $p = 1013\text{ hPa}$, $C_s = 0\text{ mg/l}$)
$SSOTR$	g O ₂ /m ³ m	Spezifische Sauerstoffzufuhr für Reinwasser ($T = 20\text{ °C}$, $p = 1013\text{ hPa}$, $C_s = 0\text{ mg/l}$)
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	m ³	Gesamte Wasservolumen im begastem Zustand
V_{Ges}	m ³	Gesamte Wasservolumen im unbegastem Zustand
V_{Luft}	m ³	Eingebrachtes Luftvolumen

x	m	Abstand von der Grenzfläche A_G
α	-	Grenzflächenfaktor
$\alpha_{k_{LA20}}$	h^{-1}	Belüftungskoeffizient für belebten Schlamm ($T = 20\text{ °C}$)
$\alpha_{k_{LAT}}$	h^{-1}	Temperaturabhängiger Belüftungskoeffizient für belebten Schlamm
α_{SAE}	kg O ₂ /kWh	Standard-Sauerstoffertag für belebten Schlamm ($T = 20\text{ °C}$, $p = 1013\text{ hPa}$, $C_S = 0\text{ mg/l}$)
α_{SOTR}	kg O ₂ /h	Standard-Sauerstoffzufuhr für belebten Schlamm ($T = 20\text{ °C}$, $p = 1013\text{ hPa}$, $C_S = 0\text{ mg/l}$)
α_{SSOTE}	%/m	Spezifische Standard-Sauerstoffausnutzung für belebten Schlamm ($T = 20\text{ °C}$, $p = 1013\text{ hPa}$, $C_S = 0\text{ mg/l}$)
α_{SSOTR}	g O ₂ /m ³ m	Spezifische Sauerstoffzufuhr für belebten Schlamm ($T = 20\text{ °C}$, $p = 1013\text{ hPa}$, $C_S = 0\text{ mg/l}$)
$\beta_{C_{S,p^*,T}}$	mg O ₂ /l	Temperaturabhängiger Versuchs-Sauerstoffsättigungswert in belebtem Schlamm
ΔF_i	%	Prozentuale Fehleranteil der Größe i
Δf_i	spezifisch	Gesamtfehler der Größe i
Δx_j	spezifisch	Größtfehler
ρ_{Luft}	kg/m ³	Dichte von Luft
ρ_{O_2}	kg/m ³	Dichte von Sauerstoff
ρ_W	kg/m ³	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: Fließschema einer Kläranlage nach Gujer (2007).	18
Abbildung 2.2: Kanülenbegaser im Betrieb (a), Gießharz-Kanülenbegaser (b) und Edelstahlbelüfter (c).	22
Abbildung 2.3: Sauerstoffkonzentrationsverlauf für die Absorptionsmethode in Wasser (DWA-M 209, 2007)	23
Abbildung 2.4: Sauerstoff-Konzentrationsverlauf für die Absorptionsmethode in Belebtschlamm (DWA-M 209, 2007)	23
Abbildung 3.1: Videometrierversuchsstand mit Hochgeschwindigkeitskamera, LED-Lichtquelle und Strömungskanal.	31
Abbildung 3.2: Mikroskopaufnahmen der Kanülenspitzen mit Innendurchmessern von 90 bis 200 μm und Schlifften von 30 bis 90°.	31
Abbildung 3.3: Lochplatten mit unterschiedlichen Lochabständen. Lochöffnungen durch grüne Kreise markiert.	32
Abbildung 3.4: Bildbearbeitungsvorgänge zur Ermittlung der Blasengröße aus Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen.	34
Abbildung 3.5 Schematische Darstellung der Blasensäulen.	35
Abbildung 3.6: Anordnung der Belüfter in den Blasensäulen (a) einzelner Tellerbelüfter, (b) zwei Tellerbelüfter, (c) Rohrbelüfter und (d) Plattenbelüfter.....	37
Abbildung 3.7: Edelstahlbelüfter Anordnung Variante 1 (a), Edelstahlbelüfter Anordnung Variante 2 (b), Edelstahlbelüfter Anordnung Variante 3 (c).....	38
Abbildung 3.8: Benutzeroberfläche des Prozessleitsystem (exemplarisch).	39
Abbildung 3.9: Beispielverlauf für den Ammoniumabbau.	42
Abbildung 4.1: Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera von generierten Luftblasen bei Kanüleninnendurchmessern von 90 bis 200 μm bei einem Gasmassestrom von 10 sml/min.	45
Abbildung 4.2: Abhängigkeit des Sauterdurchmessers vom Gasmassestrom für unterschiedliche Kanüleninnendurchmesser.	45
Abbildung 4.3: Sauterdurchmesser und Druckverlust bei der Blasenbildung an Kanülen mit 5 mm Länge mit einem Gasmassestrom von 10 sml/min in Abhängigkeit vom Kanüleninnendurchmesser.....	46
Abbildung 4.4: Abhängigkeit des Sauterdurchmessers vom Gasmassestrom bei der Blasenbildung aus Kanülen mit 30°, 60° bzw. 90° Schliff.....	47
Abbildung 4.5: Abhängigkeit des Sauterdurchmessers vom Gasmassestrom bei der	

Blasenbildung aus Kanülen mit 5 bzw. 15 mm Länge.	47
Abbildung 4.6: Blasenbildung von Einzellochplatten bei unterschiedlichen Lochdurchmessern und einem Gasmassestrom von 10 sml/min.	48
Abbildung 4.7: Sauterdurchmesser für Einzellochplatten bei unterschiedlichen Gasmasseströmen.	49
Abbildung 4.8: Druckverlust und Sauterdurchmesser bei Einzellochplatten in Abhängigkeit vom Lochinnendurchmesser für 10 sml/min Gasmassestrom.	49
Abbildung 4.9: Sauterdurchmesser für Lochplatten mit 11 Löchern bei unterschiedlichen Gasmasseströmen.	50
Abbildung 4.10: Einfluss der Plattendicke von Lochplatten auf den Sauterdurchmesser in Abhängigkeit vom Gasmassestrom.	50
Abbildung 4.11: Einfluss des Lochabstandes von Lochplatten auf den Sauterdurchmesser bei der Blasenbildung in Abhängigkeit vom Gasmassestrom.	51
Abbildung 4.12: Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Sauterdurchmesser bei der Blasenbildung von Lochplatten in Abhängigkeit vom Gasmassestrom.	52
Abbildung 4.13: 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.	53
Abbildung 4.14: Verlauf der Spezifische Standard-Sauerstoffzufuhr für je einen Tellerbelüfter.	55
Abbildung 4.15: Verlauf des Druckverlustes für je einen Tellerbelüfter.	55
Abbildung 4.16: Verlauf des Sauerstoffertes für je einen Tellerbelüfter.	56
Abbildung 4.17: Gegenüberstellung des Verlaufes der Spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr für einen (x1) und zwei (x2) Tellerbelüfter.	57
Abbildung 4.18: Gegenüberstellung des Verlauf des Druckverlustes für einen und zwei Tellerbelüfter.	58
Abbildung 4.19: Gegenüberstellung des Verlaufes des Sauerstoffertes bezogen auf die Abgasfläche für einen und zwei Tellerbelüfter.	58
Abbildung 4.20: Verlauf der Spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr der Rohrbelüfter.	59
Abbildung 4.21: Verlauf des Druckverlustes der Rohrbelüfter.	59
Abbildung 4.22: Verlauf des Sauerstoffertes der Rohrbelüfter.	60
Abbildung 4.23: Verlauf der Spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr des Platten- und der Edelstahlbelüfter.	60

Abbildung 4.24: Verlauf des Druckverlustes des Platten- und der Edelstahlbelüfter. ...	61
Abbildung 4.25: Verlauf des Sauerstoffertes des Platten- und der Edelstahlbelüfter.	61
Abbildung 4.26: Gegenüberstellung des Verlaufes der Spezifischen Standard- Sauerstoffzufuhr der Edelstahlbelüfter EB3 mit Variation der Anordnung.	62
Abbildung 4.27: Gegenüberstellung des Sauerstoffertes der effektivsten	63
Abbildung 4.28: Gegenüberstellung der Spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr der in Abhängigkeit des Sauerstoffertes effektivsten Belüftungselemente.	64
Abbildung 4.29: Gegenüberstellung der spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr der Belüfter im entionisiertem und salzversetztem Wasser mit $CNa_2SO_4 = 0,5 \text{ g/l}$	65
Abbildung 4.30: Gegenüberstellung des Sauerstoffertes der Belüftungselemente im entionisiertem und salzversetztem Wasser mit $CNa_2SO_4 = 0,5 \text{ g/l}$	65
Abbildung 4.31 Gegenüberstellung des Druckverlustes der Belüftungselemente im entionisiertem und salzversetztem Wasser mit $CNa_2SO_4 = 0,5 \text{ g/l}$	66
Abbildung 4.32: Edelstahlbelüfter auf Schlitten nach komplettem Durchlauf der Sauerstoffeintragsversuche.....	67
Abbildung 4.33: Vergleich der Standard-Sauerstoffzufuhr in Reinstwasser und Belebtschlamm für ausgewählte Belüfter.	67
Abbildung 4.34: Vergleich des Druckverlustes von Edelstahl- und Standardbelüftern in Reinstwasser und Belebtschlamm in Abhängigkeit vom Gasmassestrom.	68
Abbildung 4.35: Vergleich des Sauerstoffertes von Edelstahl- und Membranbelüftern in Reinstwasser und Belebtschlamm in Abhängigkeit vom Gasmassestrom.	69
Abbildung 4.36: Verlauf der Spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr in Abhängigkeit der Einblastiefe bei $2 \text{ m}^3\text{N/h}$	70
Abbildung 4.37: Verlauf der Spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr in Abhängigkeit der Einblastiefe bei $3 \text{ m}^3\text{N/h}$	70
Abbildung 4.38: Verlauf der Spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr in Abhängigkeit der Einblastiefe je Sauerstoffsonde bei $3 \text{ m}^3\text{N/h}$	71
Abbildung 4.39: Verlauf des Sauerstoffertes in Abhängigkeit der Einblastiefe bei $2 \text{ m}^3\text{N/h}$	72
Abbildung 4.40: Verlauf des Sauerstoffertes in Abhängigkeit der Einblastiefe bei $3 \text{ m}^3\text{N/h}$	72
Abbildung 4.41: Verlauf des Druckverlustes in Abhängigkeit der Einblastiefe bei $2 \text{ m}^3\text{N/h}$	73

Abbildung 4.42: Verlauf des Druckverlustes in Abhängigkeit von der Einblastiefe bei 3 m ³ N/h.	73
Abbildung 4.43 Spezifische Standardsauerstoffzufuhr bei 2,8 m Einblastiefe im Vergleich zwischen Belüftern in Reinstwasser und Belebtschlamm.....	74
Abbildung 4.44: Standardsauerstofftrag bei 2,8 m Einblastiefe im Vergleich zwischen Belüftern in Reinstwasser und Belebtschlamm.	74
Abbildung 4.45: Schlamm sedimentation während der Belüftung mit 2,8 m Einblastiefe. Aufgenommen durch das unterste Schauglas der Technikumsanlage.....	75
Abbildung 4.46: Konzentrationsverlauf von Ammonium und Nitrat bei einem Abbauversuch in der Technikumsanlage.	76
Abbildung 4.47: Mittlerer Druckverlust während des Ammoniumabbaus in der Technikumsanlage für acht Belüfterkonfigurationen.....	77
Abbildung 4.48: Verhältnis von abgebauter Ammoniummasse zu eingesetzter Luftmasse für vollständigen Ammoniumabbau.....	77
Abbildung 4.49: Vergleich der Reinigungsleistung bezogen auf die Belüfterfläche in Belebtschlamm für verschiedene Belüfter.	78
Abbildung 4.50: Vergleich der Reinigungsleistung bei Regelzielen zwischen 1 und 2 mg/l Sauerstoffgehalt in Belebtschlamm für eine Belüfterauswahl.....	79

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Abmaße der verwendeten Kanülen.	32
Tabelle 3.2: Spezifikationen der verwendeten Lochplatten (ep: elektropoliert, up: unpoliert).	33
Tabelle 3.3: Sensoren an der Versuchsanlage für das SEBAK-Projekt	36
Tabelle 3.4 Übersicht der Belüfterkenndaten	37
Tabelle 3.5: Versuche für die Bestimmung der Reinigungseffizienz mit Belebtschlamm. Zusammenstellung der verwendeten Belüfter.	41
Tabelle 5.1: Zusammenstellung der Belüfter für die Wirtschaftlichkeitsanalyse mit deren Steigerung in SAE_{Bel} und Reinigungsleistung.	80
Tabelle 5.2: Energieverbrauch und Einsparungen anhand der SAE_{Bel} -Verbesserung im Vergleich zum Plattenbelüfter 1.....	81
Tabelle 5.3: Energieverbrauch und Einsparungen anhand der Reinigungsleistungsverbesserung im Vergleich zum Plattenbelüfter 1.....	82
Tabelle 5.4: Amortisationszeiten für verschiedene Belüfter. Berechnet nach SAE_{Bel} - bzw. Reinigungsleistungsverbesserung.	83
Tabelle 8.1: Energie- und CO ₂ -Einsparung nach SAE_{Bel} -Verbesserung.....	90
Tabelle 8.2: Amortisationsrechnung nach SAE_{Bel} -Verbesserung	90
Tabelle 8.3: Energie- und CO ₂ -Einsparung nach Reinigungsleistungsverbesserung ..	91
Tabelle 8.4: Amortisationsrechnung nach Reinigungsleistungsverbesserung.....	91

Zusammenfassung

Auf die kommunale Abwasserreinigung in Deutschland fallen ca. 1 % des Gesamtstromverbrauches zurück. Allein die über 600 Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen sind für über 1.000 GWh Stromverbrauch pro Jahr verantwortlich (MKULNV, 2014). In den Kläranlagen ist die biologische Reinigungsstufe mit bis zu 80 % Anteil der größte Energieverbraucher. Ursache hierfür ist die Belüftung der in der Regel 4 bis 6 m tiefen Belebungsbecken, in denen die Nitrifikation des Abwassers stattfindet. Die für den Abbau verantwortlichen Mikroorganismen benötigen Sauerstoff, welcher durch Einblasen von Luft mit Belüftern am Beckenboden eingebracht wird. Aufgrund der hohen aufzuwendenden Drücke zum Einblasen der Luft in die tiefen Becken und der unzureichenden Ausnutzung des eingeblasenen Sauerstoffs in den Luftblasen ist der Energiebedarf für die Belüftung hoch. Eine Effizienzsteigerung soll durch die Entwicklung optimierter Belüfter erfolgen.

Ziel des Projektes war die Evaluierung von Belüftern mit starren Lochöffnungen im Mikrometerbereich in Bezug auf eine effizientere Sauerstoffzufuhr in Belebungsbecken der Abwasserreinigung. Dafür wurden Kanülenbegaser bzw. deren Weiterentwicklung in Form von Edelstahlbelüftern verwendet. Das Belüftungskonzept mit starren Lochöffnungen wurde in videometrischen Untersuchungen mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera in Bezug auf die initiale Blasengröße untersucht. Dabei wurde der Vorteil von starren Lochöffnungen in Form kleinerer Blasendurchmesser im Bereich unter 1,5 mm aufgezeigt. Aus energetischer Sicht sind Lochplatten den ebenfalls untersuchten Kanülen aufgrund des geringeren Druckverlustes vorzuziehen. Weiterhin wurde gezeigt, dass mit dünneren Lochplatten (300 μm) und geringen Lochabständen (5 mm) bessere Ergebnisse in Bezug auf die Blasengrößen erzielt werden.

In Absorptionsversuchen in einer Technikumsanlage mit bis zu 4 m Einblastiefe wurde die Sauerstoffzufuhr, der Druckverlust und der Sauerstofftrag für Edelstahlbelüfter mit 30 μm , 50 μm bzw. 70 μm großen Lochöffnungen sowie für kommerziell erhältliche Teller-, Platten- und auch Rohrbelüfter bestimmt. Als Versuchsmedien wurden Reinstwasser, salzhaltiges Wasser und Belebtschlamm aus der Kläranlage Ottendorf-Okrilla genutzt. In Reinstwasser konnten die Edelstahlbelüfter mit den hohen Sauerstoffzufuhrwerten überzeugen. Trotz des durch die geringen Durchmesser der Lochöffnungen bedingten höheren Druckverlusts erreichen die Edelstahlbelüfter im Vergleich zu den konventionellen Belüftern höhere Sauerstofftragswerte bezogen auf ihre aktive Fläche. Eine Reduktion des Druckverlustes und damit eine weitere Steigerung des *SAE*

für vergleichbare Gasmasseströme ist durch eine angepasste Auslegung des Belüftungssystems mit einem höheren Materialaufwand – Anpassung der aktiven Fläche – gegenüber konventionellen Belüftern erreichbar.

Das positive Ergebnis für den Edelstahlbelüfter mit 70 µm Lochöffnungen wird in salzhaltigem Wasser und in Belebtschlamm bestätigt. Bei Edelstahlbelüftern mit 30 und 50 µm Lochöffnungen sinkt bei Belebtschlamm der Sauerstofftrag im oberen Bereich der untersuchten Luftdurchsätze auf das Niveau der untersuchten Standardmembranbelüftern.

Die Reinigungsleistung der Belüfter wurde durch vollständige Nitrifikation von Belebtschlamm und die Bestimmung der gesamten eingeblasenen Luftmenge, sowie der dafür benötigten Energie, bestimmt. Die Edelstahlbelüfter mit 70 µm Löchern zeigen gegenüber den Membranbelüftern eine um mindestens 13 % höhere Reinigungsleistung bezogen auf die aktive Belüfterfläche.

Da mit geringerer Einblastiefe der hydrostatische Druck über den Belüftern sinkt, sollte dies als Möglichkeit zur Energieeinsparung bei der Belüftung untersucht werden. Die Belüfter wurden auf geringeren Tiefen befestigt, sodass unter den Belüftern ein unbelüftetes Volumen entstand. Die Sauerstoffzufuhrversuche zeigten, dass bei drei über die Höhe der Technikumsanlage verteilten Sauerstoffsensoren vor allem eine Abnahme der Sauerstoffzufuhr im unbelüfteten Bereich zu bemerken ist. Der Druckverlust der Belüfter ist gleichbleibend. So führen die sinkenden mittleren SSOTR-Werte bei geringeren Einblastiefen zu insgesamt sinkenden Sauerstoffträgen. Bei Verwendung von Belebtschlamm als Versuchsmedium wurde bei reduzierter Einblastiefe weiterhin die Sedimentation von Belebtschlammteilchen im Bereich unter den Belüftern beobachtet.

Anhand der ermittelten Steigerungen von Reinigungsleistung und Sauerstofftrag der Edelstahlbelüfter wurde eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt. Dabei wurden Amortisationszeiten der Edelstahlbelüfter von unter 2,6 Jahren bestimmt. Aufgrund der hohen Investitionskosten für die Edelstahlbelüfter sind die Amortisationszeiten noch recht hoch im Vergleich zu den Standardmembranbelüftern. Dies ist durch Design- und Fertigungsoptimierungen des Belüfterkonzeptes noch verbesserbar. Vor einem Betrieb unter realen Bedingungen in Kläranlagen ist für die Edelstahlbelüfter noch ein Langzeittest notwendig, da es bisher keine langfristigen Erkenntnisse über Effekte wie Fouling oder Clogging bei den Edelstahlbelüftern mit ihren mikrometergroßen Lochöffnungen gibt.

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 eingetragenen Gasvolumen erzeugte Stoffübergangsfläche und die individuelle Verweilzeit der Blasen erhöht. Das erhöht den Sauerstoffübergang aus der Luftblase in den Belebtschlamm während des Blasenanstiegs 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 Sauerstofftrag 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

Im folgenden Kapitel werden der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik der biologischen Abwasserbehandlung und von Druckbelüftungssystemen, diesbezügliche Optimierungspotenziale und die Grundlagen des Sauerstoffeintrags in kompakter Form vorgestellt. Weiterhin werden die angewendeten Methoden zur messtechnischen Erfassung des Sauerstoffzufuhrvermögens von Belüftungssystemen und der energetischen und wirtschaftlichen Bewertung der Belüftungselemente erläutert. betrachtet.

2.1 Biologische Abwasserbehandlung

2.1.1 Belebtschlammprozess

Belebungsbecken sind mit dem darin ablaufenden Belebtschlammprozess die zentrale Reinigungsstufe in modernen Kläranlagen (siehe Abbildung 2.1). Nach der mechanischen Reinigungsstufe gelangt das Abwasser in die Belebungsbecken, wo die gelösten kohlenstoff- und stickstoffhaltigen Inhaltsstoffe in den suspendierten Belebtschlammflocken von Mikroorganismen abgebaut werden. Der dafür nötige Sauerstoff wird durch Belüfter in 4-6 m Tiefe am Beckenboden eingetragen. Daher muss der hydrostatische Druck im Becken überwunden werden, damit die Luft in Form feiner Blasen die Belüfter verlassen kann. Der Belüfter selbst hat einen Druckverlust, der zusätzlich überwunden werden muss. Der aufzuwendende Druck und der hohe Bedarf an Luft sind die Hauptgründe für den hohen Energiebedarf. Hinzu kommen unzureichend feine Luftblasen und schlechte Sauerstoffzufuhr aus den Luftblasen in den Belebtschlamm.

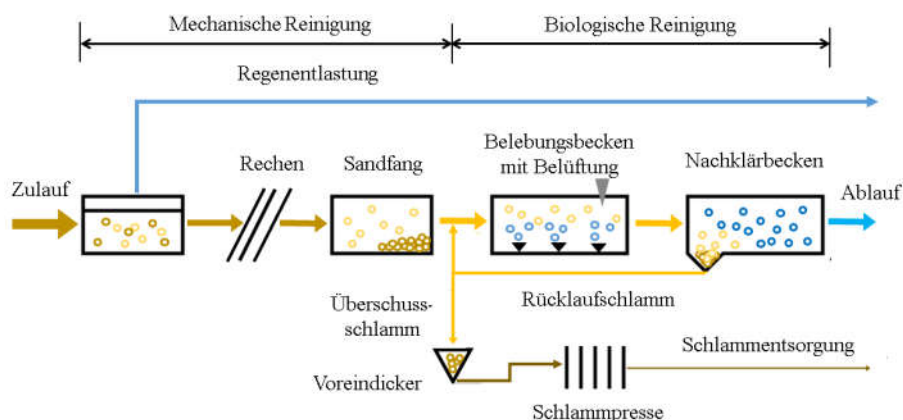


Abbildung 2.1: Fließschema einer Kläranlage nach Gujer (2007).

2.1.2 Aktuelle Druckbelüftungssysteme

Der Einsatz von Druckbelüftungssystemen bildet bei der Zufuhr von Sauerstoff und der optimalen Versorgung der Mikroorganismen ein zentrales Thema. Für die Erzeugung der Luftblasen kommen Belüfter zum Einsatz, welche am Beckenboden des Belebungsbeckens installiert werden. Über Gebläse wird atmosphärische Luft, welche einen Sauerstoffanteil von etwa 21 % ausweist, in das Belebungsbecken eingetragen. Die Nutzung von Reinsauerstoff spielt bei der kommunalen Abwasseraufbereitung eine untergeordnete Rolle und findet in seltenen Fällen zur Abdecken von etwaigen Bedarfsspitzen statt.

Bei der Nutzung von Druckbelüftungssystemen müssen verschiedene technische sowie wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt werden. Neben einer möglichst optimalen Zufuhr von Sauerstoff über die Belüftungselemente, wird eine den Belastungsverhältnissen (Schlammmenge, BSB, CSB, N- und P-Konzentration) angepasste Regelbarkeit und Beständigkeit angestrebt. Darüber hinaus soll eine möglichst intensive Durchmischung des Abwasser-Schlamm-Gemisches, durch turbulente Strömungen gewährleistet werden. Dies soll, neben einem optimalen Kontakt von Sauerstoff und Belebtschlammflocke, gleichzeitig eine Sedimentation und somit Ablagerung von Schlamm verhindern.

Da Kläranlagen kontinuierlich betrieben werden, steht den technischen Anforderungen der wirtschaftliche Betrieb gegenüber. Dieser setzt eine möglichst lange Betriebszeit der Belüfter, bei einem möglichst geringem Energie- und Wartungsaufwand voraus. Das heißt, dass die Belüfter effektiv den Sauerstoff eintragen, Beständigkeit gegenüber mechanischen und chemischen Angriffen und gleichzeitig preiswert zu fertigen sein sollen (Triebel, 1985; ATV-Handbuch, 1997). Die Einsatzdauer von Belüftungselementen wird laut dem Merkblatt DWA-M 229-1 (2013) mit 5 bis 10 Jahren angegeben.

Für die feinblasigen Belüftungssysteme haben sich in der praktischen Anwendung drei Grundformen durchgesetzt. Die typischen Ausführungen sind Rohr-, Teller- und Plattenbelüfter. Je nach Form und Größe dieser Elemente können die Belüfterfläche sowie die Anzahl der Löcher und Schlitze variieren. Bei Rohrbelüftern, welche in der Regel eine Länge von 500 bis 2000 mm und einen Durchmesser von 40 bis 100 mm besitzen, wird die Belüfterfläche über den gesamten Umfang betrachtet. Unabhängig vom eingesetzten Material wird allseitig begast. Befestigt werden die Rohre über den Versor-

gungsanschluss, welcher sich an der Längsseite befindet. Materialien wie Keramik oder poröse Plastiken bilden bei Rohrbelüftern das Belüftungselement. Kommen Membranen für die Blasenbildung zum Einsatz, werden diese über ein Stützrohr mit entsprechenden Luftöffnungen gespannt.

Tellerbelüfter hingegen sind flach und kreisförmig. Der Tellerdurchmesser reicht von 15 bis 50 cm. Die Belüfterfläche befindet sich auf der Oberseite des Belüfters. Die Unterseite dient weiterhin der Befestigung und dem Anschluss an die Luftversorgung. Bei Tellerbelüftern wird ebenfalls eine gelochte oder geschlitzte Membran zur Erzeugung von Luftblasen verwendet, welche über eine Tellerscheibe gespannt wird. Bei Beaufschlagung mit Luft wölbt sich diese in der Regel nach oben.

Plattenbelüfter sind im Grundaufbau dem Tellerbelüfter sehr ähnlich und können eine ovale oder rechteckige Form besitzen. Die Poren für die Blasenbildung befinden sich ebenfalls auf der Oberseite des Belüfters und an der Unterseite die Möglichkeit zur Befestigung sowie die Öffnung für die Luftzufuhr. Die Maße der Plattenbelüfter reichen von 15 bis 100 cm Breite und Längen zwischen 40 bis 300 cm. Für die Bildung der Luftblasen wird häufig ein gelochtes Folienmaterial verwendet. Dieses wird auf eine Faserzement-, Metall- oder Kunststoffplatte gespannt (ATV-Handbuch, 1997; Wagner, 2002).

In der Literatur gibt es nur eine begrenzte Anzahl von wissenschaftlichen Arbeiten mit Informationen über Blasengrößen von Membranbelüftern. Oft wurden nur Blasengrößenbestimmungen von Einzellöchern untersucht, da die Messung der Blasengröße in den dichten Blasenschwärmen mit optischen Messmethoden nur schwer möglich ist. Durch verschiedene Techniken wie Ansaugkapillare (Hasanen et al. 2006), ultraschnelle Röntgentomografie (Sommer et al. 2016) und präparierte Belüfter mit Hochgeschwindigkeitskameras (Loubiere und Hebrard 2003) konnten so mittlere Sauterdurchmesser für Membranbelüfter im Bereich zwischen 2,5 und 4 mm bestimmt werden.

2.1.3 Materialien feinblasiger Druckbelüftungselemente

In Abhängigkeit der Form der Belüfter und deren Einsatzgebiete, werden verschiedene Materialien verwendet. Bei der Nutzung keramischer Elemente handelt es sich um poröse Werkstoffe wie Silikate oder Aluminiumoxide. Diese werden bei etwa 1000 °C gesintert. Preislich günstiger, jedoch weniger stabil, sind gesinterte Kunststoffgranulate

oder Elemente aus poröser Plastik. Bei Letzteren kommen Werkstoffe wie Hochdruckpolyethylen (HPDE) oder Styrolacrylnitril (SAN) zum Einsatz. Bei diesen Belüftern bestimmt die Korngröße die Größe der Hohlräume und somit den Blasendurchmesser und den Druckverlust. Aufgrund der starren Form, kann es bei der Verwendung von porösen Werkstoffen leicht zum Verschluss der Poren kommen.

Wesentlich verbreiteter als Belüfter mit starren Öffnungen aus gesinterten Materialien sind Belüfter mit gelochten oder geschlitzten Membranen als Belüfterfläche. Diese werden aus diversen Elastomeren hergestellt. Als Basiselastomer findet unter anderem Ethylenpropylenkautschuk (EPDM), Silikon oder Polyurethan (PU) Verwendung.

EPDM besitzt eine hohe mechanische Festigkeit und ist chemisch beständig. Für die Öffnung der Poren der EPDM-Membran wird typischer Weise ein Mindestdruck von circa 15 hPa benötigt. Die Verwendung von Silikon- gegenüber einer EPDM-Membran hat den Vorteil, dass diese keine löslichen Weichmacher enthalten. Die typischerweise 1 bis 3 mm starken Membranen sind chemisch sehr beständig, besitzen jedoch eine geringere Reißfestigkeit bei mechanischer Beanspruchung. Die PU-Membran wird als eine dünne Folie zwischen 0,5 und 2 mm Stärke verwendet (DWA-M 229-1, 2013).

Als größter Vorteil der Membranen gegenüber den starrporösen Werkstoffen ist, dass die Membranöffnungen sich bei der Beaufschlagung mit Luft öffnen und bei Ausbleiben des Volumenstromes wieder schließen. Damit wird die Wahrscheinlichkeit des Verstopfens der Poren verringert. Weiterhin werden dadurch weitere Betriebsmodi ermöglicht, wie beispielsweise die Nitrifikation und Denitrifikation im gleichen Becken (ATV-Handbuch, 1997; Wagner, 2002).

2.1.4 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 Aufstiegs geschwindigkeit 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 2.2). 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 2.2 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.

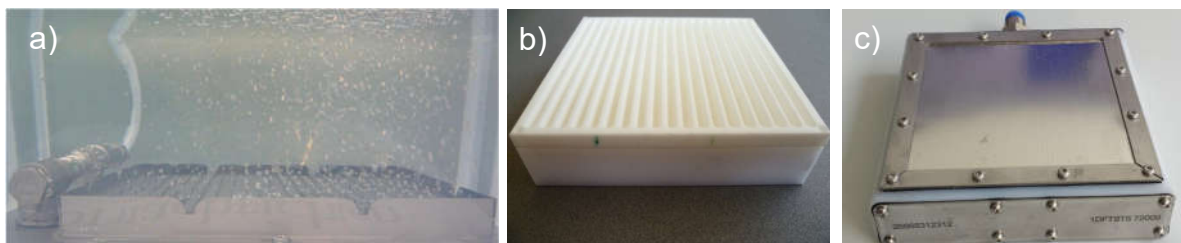


Abbildung 2.2: Kanülenbegaser im Betrieb (a), Gießharz-Kanülenbegaser (b) und Edelstahlbelüfter (c).

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 2.3 zeigt schematisch den Konzentrations-Zeit-Verlauf für Reinwasser und Abbildung 2.4 für belebten Schlamm.

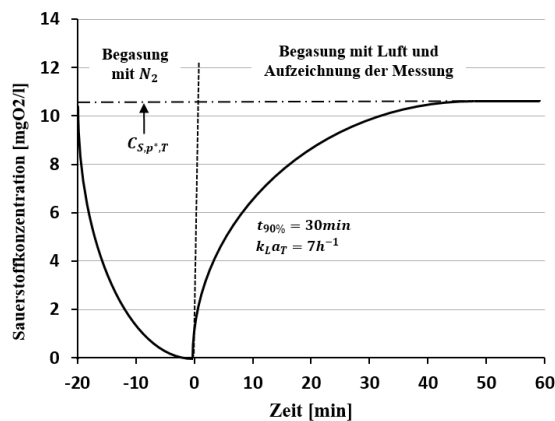


Abbildung 2.3: Sauerstoffkonzentrationsverlauf für die Absorptionsmethode in Wasser (DWA-M 209, 2007)

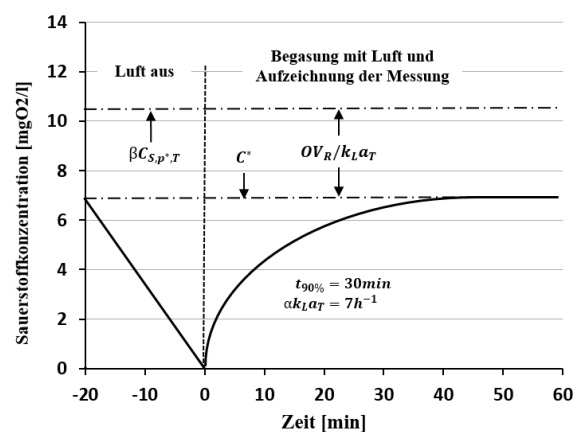


Abbildung 2.4: Sauerstoff-Konzentrationsverlauf für die Absorptionsmethode in Belebtschlamm (DWA-M 209, 2007)

Bei Versuchen in Reinwasser kann der Sauerstoffgehalt durch die Begasung mit Stickstoff abgesenkt werden. Eine Alternative zu Stickstoff stellt die Zugabe von Natriumsulfid 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.

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

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

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 $k_L a$ -Ermittlung, müssen die Messungen in Abhängigkeit des $k_L a$ -Wertes und des $C_{S,p^*,T}$ -Wertes laut DIN EN 12255-15 (2004) in einem Zeitintervall von mindestens $t = 3,5/k_L a$ 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 $T = 20 \text{ °C}$. Für eine bestimmte Leistung eines Belüfters, in einem bestimmten Beckenvolumen ist der $k_L a_{20}$ -Wert als konstant anzusehen.

$$k_L a_{20} = k_L a_T \cdot 1,024^{(20-T_w)} \quad [\text{h}^{-1}] \quad (2.3)$$

Der Versuchs-Sauerstoffsättigungswert wird, entsprechend der Gleichung (2.4), ebenfalls auf den Normdruck von $p = 1013 \text{ hPa}$ und $T = 20 \text{ °C}$ 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.

$$C_{S,20} = C_{S,p^*,T} \cdot \frac{C_{S,St,20}}{C_{S,St,T}} \cdot \frac{1013}{p^*} \quad [\text{mg O}_2/\text{l}] \quad (2.4)$$

$$\beta C_{S,p^*,T} = C^* + \frac{OVR}{\alpha k_L a_T} \quad [\text{mg O}_2/\text{l}] \quad (2.5)$$

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 ($T = 20 \text{ °C}$ und $p = 1013 \text{ hPa}$), in einem bestimmten Volumen an Flüssigkeit löst. Für Versuche in belebtem Schlamm wird der *SOTR* entsprechend als α *SOTR* ermittelt.

$$SOTR = \frac{V_{\text{ges}} \cdot k_L a_{20} \cdot C_{S,20}}{1000} \quad [\text{kg O}_2/\text{h}] \quad (2.6)$$

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 α *SSOTE* und der α *SSOTR*, 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.

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

$$SSOTR = \frac{SOTR}{Q_{L,St} \cdot h_D} \cdot 1000 \quad [\text{g O}_2/(\text{m}^3 \cdot \text{m})] \quad (2.8)$$

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.

$$\alpha = \left(\frac{k_{L,a_{20}}(\text{für belebten Schlamm})}{k_{L,a_{20}}(\text{für Reinwasser})} \right) \quad [-] \quad (2.9)$$

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 $\beta = 1$ (DWA-M 209, 2007). Für hohe Salzkonzentrationen liegt dieser Wert aufgrund der verringerten Sauerstofflöslichkeit deutlich unter 1 (ATV-Handbuch, 1997).

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

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 Belebungsbecken Grundfläche nach Gleichung (2.11) angibt. Die Abgasfläche beschreibt dabei die Fläche der Belüfter, von der sich die Luftblasen aktiv ablösen können.

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

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.

Weiterhin ist die Sauerstoffzufuhr von der Einblastiefe, beziehungsweise vom entsprechenden hydrostatischen Druck abhängig. Mit steigender Einblastiefe wird der Stoffübergang gas/flüssig aufgrund des entsprechenden Sättigungsdefizits am Beckenboden begünstigt. Dies gilt gleichzeitig als größter Vorteil tiefliegender gegenüber hochliegenden Belüftungssystemen. Eine Erhöhung der Einblastiefe heißt ebenfalls, dass die Verweilzeit der Luftblase im Wasser verlängert wird. Somit kann mehr Sauerstoff an das Wasser abgegeben werden. Zu beachten ist jedoch, dass während des Aufstiegs gleichzeitig die Konzentrationsdifferenz zwischen der Luftblase und dem umgebenden Wasser sowie der Sauerstoff-Partialdruck abnehmen. Zudem besitzt die Einblastiefe einen Einfluss auf die spezifische Grenzfläche für den Stofftransport. Mit Erhöhung der Tiefe nimmt infolge der Kompression der Blasendurchmesser ab und somit bei gleichem Norm-Luftvolumenstrom die spezifische Grenzfläche zu (Pöpel, 1985; Steinmetz, 1996; Pöpel & Wagner, 1994).

Der Gasmassestrom ist dabei laut dem Merkblatt (DWA-M 229-2, 2016) als der Luftvolumenstrom beschrieben, welcher durch die abgasende Belüfterfläche tritt. Eine Erhöhung des Luftvolumenstromes hat eine Steigerung der Sauerstoffzufuhr zur Folge. Jedoch reduziert sich die Sauerstoffausnutzung aufgrund der sinkenden spezifischen Grenzfläche durch die höhere Blasengröße und Koaleszenzrate (DWA-M 229-1, 2013). Weiterhin führt ein höherer Gasmassestrom zu einem höheren Druckverlust der Belüftungselemente. Diese Effekte konnten durch die Untersuchungen von Frey (1996), Steinmetz (1996), Beyersdorf (1997) und Wagner (2002) nachgewiesen werden. Ursache ist die an den geöffneten Löchern ansteigende Strömungsgeschwindigkeit der Luft. Ebenfalls wird der Druckverlust durch die Anzahl und Größe der Öffnungen, über welche die Blasen gebildet werden können, beeinflusst (ATV-Handbuch, 1997).

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 Instandhaltungskosten (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.

$$e_{Bel} = \frac{E_{Bel}}{EW_{CSB}} \text{ [kWh/E} \cdot \text{a]} \quad (2.12)$$

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 Druckluftherzeuger 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.

$$e_{Bel,OV} = \frac{E_{Bel}}{OV_{h,aM} \cdot 8760} \text{ [kWh/kg O}_2\text{]} \quad (2.13)$$

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-Sauerstofftrages 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).

$$SAE = \frac{SSOTR \cdot h_D}{E} \quad [\text{kg O}_2/\text{kWh}] \quad (2.14)$$

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

$$E = E_0 \cdot \left(h_D + \frac{\Delta p}{98,07} \right)^Y \quad [\text{Wh}/\text{m}^3] \quad (2.15)$$

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 Sauerstofftrag pro Belüftungsfläche folgt daher die Gleichung (2.16). Damit soll sichergestellt werden, dass eine Beurteilung unabhängig von der Belüftergröße erfolgen kann.

$$SAE_{Bel} = \frac{SAE}{A_G} \quad [\text{kg O}_2/(\text{kWh} \cdot \text{m}^2)] \quad (2.16)$$

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.

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

3 Material und Methoden

Auf Basis der theoretischen Grundlagen wird nachfolgend das methodische Vorgehen zur Untersuchung der Belüftungselemente beschrieben. Das Ziel besteht darin, das Sauerstoffeintragsvermögen sowie die Energieeffizienz der Belüftungselemente experimentell zu bestimmen. In diesem Kapitel werden der verwendete Versuchsaufbau, die Messtechnik sowie die Durchführung der Absorptionsversuche mit entsprechenden Betriebsbedingungen dargelegt. Weiterhin bildet die Auswertung der Messergebnisse und deren Beurteilung ein zentrales Thema.

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.

3.1.1 Videometrieversuchsstand

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. Dabei wurde eine Auflösung von 1920 x 740 Pixel genutzt, welche eine reale Fläche von 22 x 55 mm abbildete, wodurch sich eine Auflösung von 29 μm pro Pixel ergibt. Die Säule wurde bis zu einem Füllstand von 800 mm mit entionisiertem Wasser (Leitfähigkeit 34 $\mu\text{S}/\text{cm}$) gefüllt. Vier Druckluftmassenströme wurden untersucht: 5, 10, 20, 50 sml/min pro Mikroöffnung. Zur Regulierung des Massestromes

wurden je nach Anzahl der Mikroöffnungen zwei Massendurchflussmesser vom Typ Omega FMA 2600 mit unterschiedlichen maximalen Durchflüssen (max. 50 sml/min bzw. 500 sml/min) genutzt. Der Druckverlust bei der Belüftung durch die Mikroöffnungen wurde mit einem Relativdrucksensor mit einem Messbereich von 0-600 mbar bestimmt.

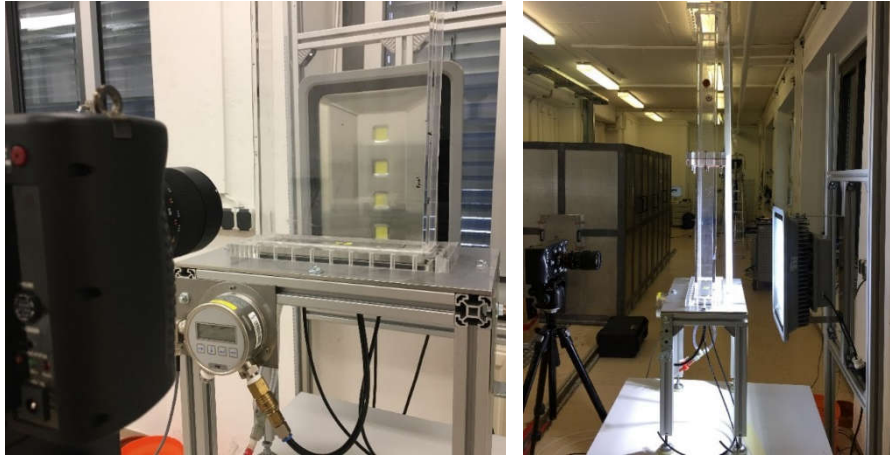


Abbildung 3.1: Videometrieversuchsstand mit Hochgeschwindigkeitskamera, LED-Lichtquelle und Strömungskanal.

3.1.2 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).

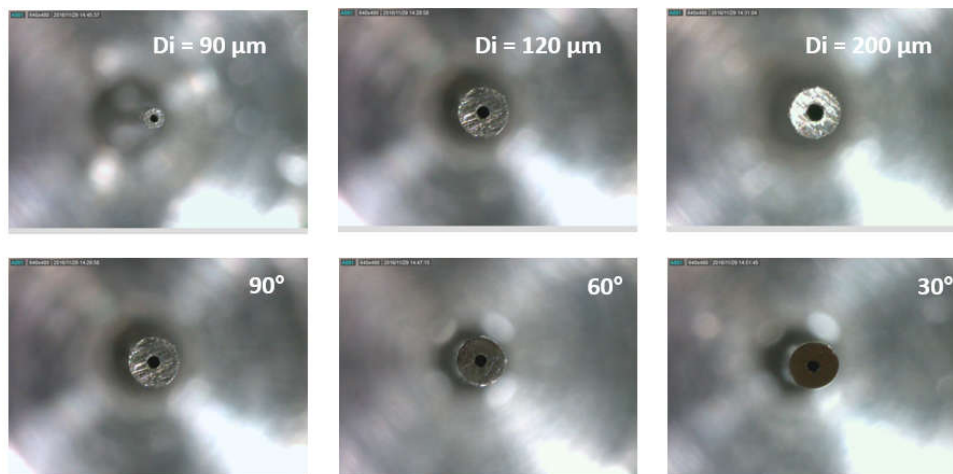


Abbildung 3.2: Mikroskopaufnahmen der Kanülenspitzen mit Innendurchmessern von 90 bis 200 μm und Schliffen von 30 bis 90° .

Tabelle 3.1: Abmaße der verwendeten Kanülen.

Bezeichnung	Lochinnendurchmesser [μm]	Länge [mm]	Schliff [$^\circ$]
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_90°	200	15	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.



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]
1-5-3-30 μm	30	1	-	ep	300
1-5-3-50 μm	50	1	-	ep	300
1-5-3-70 μm	70	1	-	ep	300
1-5-3-90 μm	90	1	-	ep	300
1-5-5-120 μm	120	1	-	ep	500
1-5-5-150 μm	150	1	-	ep	500
1-5-5-200 μm	200	1	-	ep	500
1-12,9-3-120 μm	120	1	-	ep	300
1-12,9-5-120 μm	120	1	-	ep	500
R1-5-3-50 μm	50	1	-	up	300
R1-5-3-70 μm	70	1	-	up	300
R1-5-3-120 μm	120	1	-	up	300
11-5-3-30 μm	30	11	5	ep	300
11-5-3-50 μm	50	11	5	ep	300
11-5-3-70 μm	70	11	5	ep	300
11-5-3-90 μm	90	11	5	ep	300
11-5-5-120 μm	120	11	5	ep	500
11-5-5-150 μm	150	11	5	ep	500
11-5-5-200 μm	200	11	5	ep	500
11-12,9-3-120 μm	120	11	12,9	ep	300
11-12,9-5-120 μm	120	11	12,9	ep	500
R11-5-3-50 μm	50	11	5	up	300
R11-5-3-70 μm	70	11	5	up	300
R11-5-3-120 μm	120	11	5	up	300

3.1.3 Auswertung der Videometriemessung

Für die Blasengrößenbestimmung wurden 2100 Bilder, die mit für jeden Versuch aufgenommen wurden, mit einer am HZDR entwickelten Software analysiert (Ziegenhein

et al. 2016). Die Hohe Bildanzahl war notwendig, um auch bei niedrigen Gasmasseströmen im Mittel mindestens 100 Blasen auswerten zu können. Die Bilder durchlaufen dabei mehrere Bildbearbeitungsschritte, um die Blasen zu detektieren (siehe Abbildung 3.4). Zuerst wird das Ausgangsbild segmentiert, um Blasen und Hintergrund voneinander unterscheiden zu können. Danach erfolgt eine Randerkennung der Blasen.

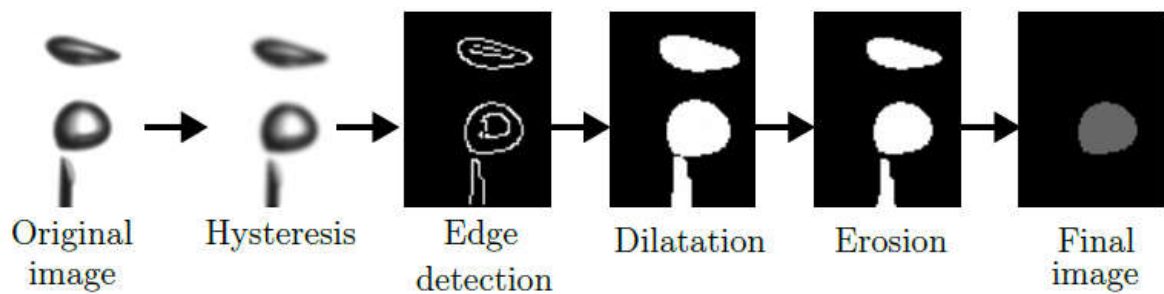


Abbildung 3.4: Bildbearbeitungsvorgänge zur Ermittlung der Blasengröße aus Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen.

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:

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

Die für die jeweiligen Kanülen bzw. Lochplatten ermittelten mittleren Sauterdurchmesser werden in Abhängigkeit vom eingesetzten Druckluftmassenstrom in Diagrammen aufgetragen und miteinander verglichen. In Kombination mit dem gemessenen Druckverlust ist eine erste Abschätzung des Energiebedarfs der Belüftung möglich.

3.2 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.

3.2.1 Versuchsaufbau der Technikumsanlage

Die Technikumsanlage ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Sie besteht aus zwei Blasensäulen, welche im Technikum der Abteilung Experimentelle Thermofluidodynamik 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 3.5) installiert. Sie verfügen über einen Messbereich von 0 bis 20 mg O₂/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.

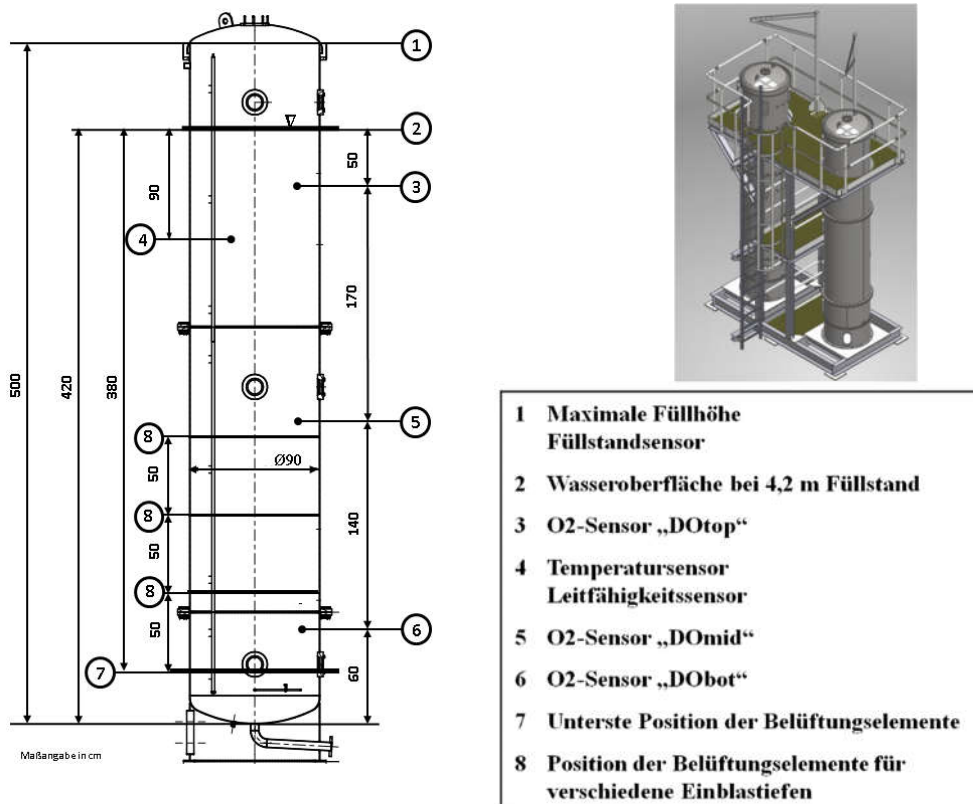


Abbildung 3.5 Schematische Darstellung der Blasensäulen.

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.

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 VARIION Plus 700 IQ	0,1 – 1000 mg/l
Gasmassstrom	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 Druckluftmassenstrom. Auf diese Weise wird der Sollwert des Sauerstoffgehaltes während des Ammoniumabbaus gehalten.

3.2.2 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} [m ²]	Außen- Ø [mm]	Länge [mm]	Breite [mm]	Lochanzahl (abgeschätzt)	Mittlere Lochdichte pro cm ²	Loch- Ø [mm]	Schlitz- länge [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-, Ethylenpropylenkautschuk- oder Silikon-Membran. Die Installation dieser Elemente in den Blasensäulen ist in Abbildung 3.6 beispielhaft dargestellt. Je nach Form wurden die weiteren Belüfter analog installiert.



Abbildung 3.6: 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 3.7). Für die Simulation eines Plattenbelüfters, wurde beispielsweise

die Anordnung in Reihe (Variante 1) verwendet. Damit ergab sich für diese Anordnung eine Gesamtabgasfläche von $0,04 \text{ m}^2$. 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.

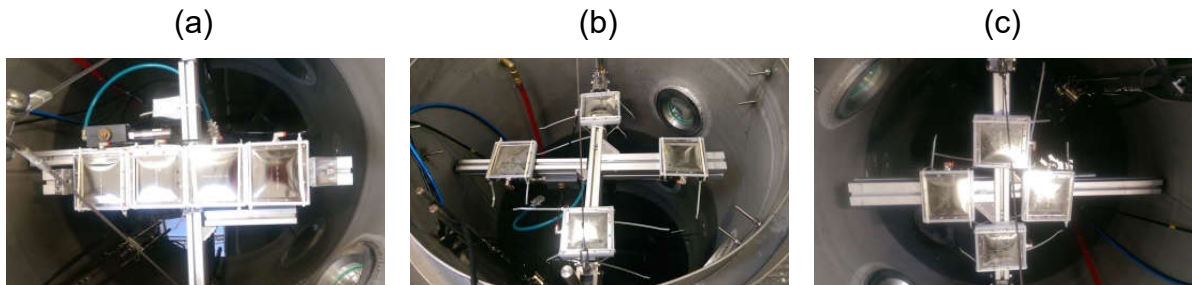


Abbildung 3.7: Edelstahlbelüfter Anordnung Variante 1 (a), Edelstahlbelüfter Anordnung Variante 2 (b), Edelstahlbelüfter Anordnung Variante 3 (c).

3.2.3 Durchführung der Absorptionsversuche

Die Absorptionsversuche wurden in Anlehnung an die DIN EN 12255-15 (2004) und das Merkblatt DWA-M 209 (2007) durchgeführt. Dabei wurde der Einfluss unterschiedlicher Volumenströme, Einblastiefen, Belegungsdichten und Anordnungen der Belüfter auf den Sauerstoffeintrag ermittelt.

Als Versuchsmedium wurden entionisiertes Wasser und Salzlösung, sowie Belebtschlamm aus der vorgeschalteten Denitrifikation einer nah gelegenen Kläranlage verwendet. Der Schlamm wurde vor den Absorptionsversuchen für die Bestimmung der Reinigungsleistung genutzt und damit vollständig nitrifiziert. Das entionisierte Wasser wurde über eine Wasseraufbereitungsanlage (Firma TKA Wasseraufbereitungssysteme GmbH) erzeugt. Dessen Leitfähigkeit wurde mittels einer Standard-Leitfähigkeitsmesszelle (Firma Xylem Inc., Typ TetraCon® 325) kontrolliert. Die Leitfähigkeit des entionisierten Wassers betrug bei allen Untersuchungen zwischen 5 und $7 \mu\text{S}/\text{cm}$. Für die Experimente im salzversetztem Wasser wurde Natriumsulfat verwendet. In Anlehnung an Zlokarnik (1980) wurde eine Konzentration von $C_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = 0,5 \text{ g/l}$ verwendet. Zum Erreichen dieser Konzentration wurde pro Säule $1,31 \text{ kg Na}_2\text{SO}_4$ in entionisiertem Wasser gelöst. Die Leitfähigkeit dieser Na_2SO_4 -Lösung betrug rund $700 \mu\text{S}/\text{cm}$. Bei allen Experimenten wurde zum Senken des Sauerstoffgehaltes Stickstoff und zur Belüftung Druckluft aus der Druckluftversorgung im Technikum verwendet. Die genutz-

ten Volumen- beziehungsweise Massenströme zum Sauerstoffeintrag lagen in Anlehnung an das ATV-Handbuch (1997) und Wagner (2002) zwischen 1 und 7 m³N/h. Die Einblastiefe betrug 3,8 m. Bei den Absorptionsversuchen mit auf bis zu 2,3m verringerter Einblastiefe (vgl. Abbildung 3.5) wurde der Gasmassestrombereich auf 1 bis 4 m³N/h reduziert, da dieser Bereich näher an der realen spezifischen Luftbeaufschlagung von 0,7 -1,0 m³Luft / (m³Becken h) für die Belebtschlammbelüftung ist (DWA-M 229-2, 2016). Die Gesamtfüllmenge umfasste rund 2,6 m³ pro Säule.

Für die Steuerung der Versuchsanlage diente ein betriebsintern erstelltes Programm, welches auf LabVIEW™ (2015) basierte. Dieses ermöglichte ein halbautomatisches und gleichzeitiges Betreiben beider Säulen. Die Visualisierung des Prozessleitsystems ist beispielhaft in Abbildung 3.8 dargestellt.

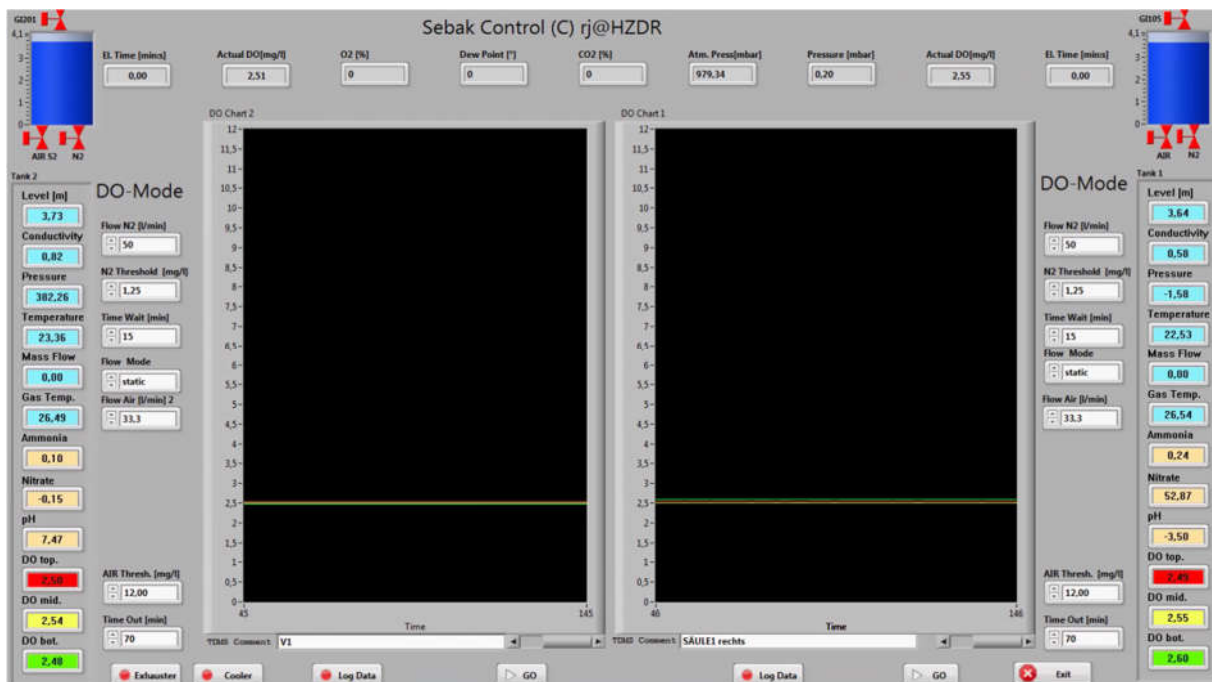


Abbildung 3.8: Benutzeroberfläche des Prozessleitsystem (exemplarisch).

In dieser Vorgabemaske wurden die notwendigen Prozessparameter eingestellt und kontrolliert. Dies sind unter anderem die Volumenströme („Flow N2“ und „Flow Air“), die obere und untere Grenze des Sauerstoffsättigungswertes („N2 Threshold“ und „AIR Threshold“) sowie Belüftungszeiten („Time Wait“ für Stickstoff und „Time Out“ für Luft).

Die Belüftungszeit wurde laut DIN EN 12255-15 (2004) mit $t_{90\%} = 3,5/k_L a$ gewählt und entsprechend den ermittelten $k_L a$ -Werten angepasst. Die Konzentrationsuntergrenze wurde mit $C_0 = 1,25 \text{ mg O}_2/\text{l}$ festgelegt und entsprach der Anforderung der DIN EN

12255-15 (2004) mit $C_0 = 0,25 \cdot C_{S,p^*,T}$. Damit wurde der Verbrauch an Stickstoff geringgehalten. Insgesamt beanspruchte eine Absorptionsmessung bestehend aus Stickstoffbegasung und Belüftung mit Druckluft eine Versuchszeit von bis zu 130 Minuten. Die Aufzeichnung und Speicherung der Messdaten erfolgte im Sekundentakt.

3.2.4 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_{LaT} für jede Messung ermittelt. Gemäß Gleichungen (2.7) und (2.8) wurden dann *SSOTR* und *SSOTE* ermittelt.

Zur Ermittlung des Standard-Sauerstoffertes (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.

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

Zum Vergleich der unterschiedlichen Belüfter wurden die ermittelten *SSOTR*, *SAE* und Druckverlustwerte gegen die eingesetzten Volumenströme in Diagrammen aufgetragen.

3.2.5 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.

Der Sauerstoffgehalt wurde, wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, mittels PID-Regler möglichst konstant gehalten. Um zum Ende des Abbaus die Sedimentation der Belebtschlammflocken aufgrund des niedrigen Druckluftmassenstromes verhindern zu können, wurde ein Mindestgasmassenstrom festgelegt. Dies führt am Ende des Nitrifikationsversuches durch den sinkenden Sauerstoffbedarf zu einem Ansteigen des Sauerstoffgehaltes.

Je nach initialer Ammoniumkonzentration, Temperatur und Sauerstoffsollwert wurde eine Versuchszeit von bis zu 8,5 Stunden pro Abbaugesuch benötigt. Dabei konnten immer zwei Belüfter parallel in den beiden Säulen getestet werden. Dies hatte den Vorteil, dass beide Belüfter in derselben initialen Schlammzusammensetzung betrieben wurden. 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

Zur Überprüfung der Messung der Ammonium- und Nitratgehalte durch die Kom-
bielektroden wurden während des Versuchsdurchlaufs Abwasserproben genommen,
die im Labor analysiert wurden. So konnte bestimmt werden, ob gegebenenfalls ein
Matrixabgleich notwendig sein würde, falls die Messungen zu stark von den Laborwer-
ten abweichen würden.

Für die Laborbestimmung der Ammoniumkonzentration wurde ein Ammonium-Rea-
genz-Test von Merck-Millipore (Spectroquant 1.00683.0001) genutzt. Für die Bestim-
mung von Nitrat wurde Spectroquant 1.09713.0001 des gleichen Herstellers verwen-

det. Für die Labormessungen wurde mittels bekannter Konzentrationen und den Reagenztests Kalibrierkurven aufgestellt. Die Stammlösung für die Kalibrierung der Ammoniummessung wurde aus Ammoniumchlorid und die für Nitrat aus Kaliumnitrat hergestellt. Nach entsprechender Probenvorbereitung konnten danach die Konzentrationen der Belebtschlammproben ermittelt und mit den Messwerten der Sonden verglichen werden.

3.2.6 Bestimmung der Reinigungseffizienz mit belebtem Schlamm

Das unmittelbare Ergebnis der Ammoniumabbauexperimente sind die Konzentrationsverläufe von Ammonium und Nitrat über den Verlauf des Experiments (Abbildung 3.9). Zusätzlich werden zur Ermittlung der Reinigungseffizienz die Verläufe von Druckluftmassenstrom und Druckverlust des Belüfters genutzt. Die Auswertung der aufgenommenen Daten erfolgte mit selbst implementierten Algorithmen (in MATLAB 2015b), auf die im Folgenden eingegangen wird.

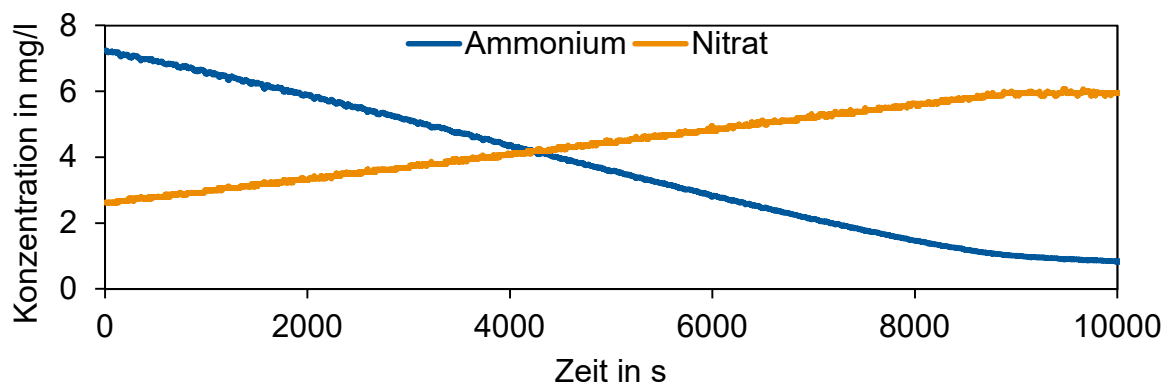


Abbildung 3.9: Beispielverlauf für den Ammoniumabbau.

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:

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

Die benötigte Luftmenge ergibt sich aus den momentanen Druckluftmassenströmen über die gesamte Versuchszeit:

$$V_{Luft} = \int_0^{t_{end}} \dot{V}(t) dt \quad [\text{s}] \quad (3.4)$$

$$m_{Luft} = V_{Luft} \cdot \rho_{Luft} \quad [\text{kg}] \quad (3.5)$$

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_{NH_4} und benötigter Arbeit berechnet:

$$E_{Bel} = E \cdot V_{Luft} \quad [\text{Wh}] \quad (3.6)$$

$$P_{NH_4} = m_{NH_4} / E_{Bel} \quad [\text{kg NH}_4 / \text{Wh}] \quad (3.7)$$

4 Ergebnisse und Auswertung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Einzelblasenuntersuchungen und der Technikumsversuche vorgestellt und diskutiert. Zuerst werden die Blasengrößen von Kanülen und Lochplatten verglichen und unter Berücksichtigung des Druckverlusts optimale Lochkonfigurationen abgeleitet.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Belüfteruntersuchungen in der Technikumsanlage vorgestellt. Die Sauerstoffeintragsversuche in Reinstwasser, Salzlösung und Belebtschlamm werden ausgewertet und die energetisch besten Belüfter für weitere Untersuchungen selektiert. Im Folgenden werden die Messwerte der ausgewählten Belüfter bei variierten Einblastiefen und deren Reinigungseffizienz ausgewertet.

4.1 Videometrieuntersuchungen von Einzelblasen

Die Videometrieuntersuchungen von Einzelblasen, welche von Kanülen bzw. Lochplatten bei unterschiedlichen Gasvolumenströmen generiert werden, wurden wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, durchgeführt. Die unterschiedlichen Lochgeometrien und deren resultierenden Blasengrößen werden verglichen.

4.1.1 Einzelkanülen

Es wurden verschiedene Kanüengeometrien in Hinblick auf die gebildeten Luftblasen untersucht. Zu den variierten geometrischen Parametern gehörten Kanüleninnendurchmesser, Kanülenlänge und Schliff. Die genauen Konfigurationen sind in Abschnitt 3.1.2 aufgeführt. Zuerst werden die Blasengrößen bei gleicher Kanülenlänge und variierten Innendurchmessern verglichen, um danach auf die Effekte von Kanülenlänge und Schliff auf die resultierenden Blasengrößen eingehen zu können.

In Abbildung 4.1 sind beispielhafte Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera der vier genutzten Kanüleninnendurchmesser bei einem Gasmassstrom von 10 sml/min dargestellt. Anhand dieser Aufnahmen ist bereits eine leichte Steigerung der Blasengröße bei steigendem Kanüleninnendurchmesser nachweisbar.

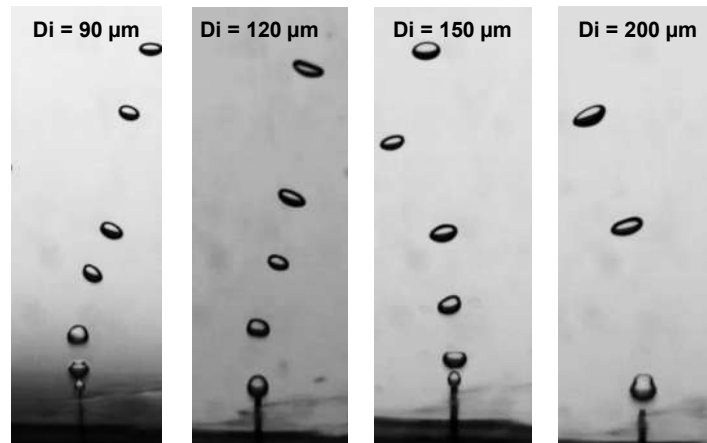


Abbildung 4.1: Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera von generierten Luftblasen bei Kanüleninnendurchmessern von 90 bis 200 μm bei einem Gasmassestrom von 10 sml/min.

Die mittleren Sauterdurchmesser der generierten Blasen sind in Abhängigkeit vom Gasmassestrom in Abbildung 4.2 dargestellt. Dabei ist das bereits in den Fotos erkannte Verhalten festzustellen. Mit dem Kanüleninnendurchmesser steigt der mittlere Sauterdurchmesser der Blasen. Auch mit höheren Gasmasseströmen werden die Blasen größer. Eine Ausnahme bildet hier jedoch die kleinste Kanüle, bei der eine Abnahme der Blasengröße ermittelt wurde. Dies wird mit einer höheren Blasenbildungsfrequenz und einem schnelleren Ablösungsverhalten erklärt. Der Messbereich liegt zwischen 5 und 50 sml/min, welcher durch den Beginn der kontinuierlichen Blasenbildung und den Beginn des Blasenjets begrenzt ist. Dies entspricht auch dem Bereich, der im Belüftungsbecken pro Loch im Membranbelüfter anzutreffen ist (Loubiere et al. 2003). Beim sogenannten Jetting, tritt durch den hohen Gasvolumenstrom Koaleszenz und Break-up direkt an der Kanüle auf, wodurch sich eine Blasengrößenermittlung erschwert.

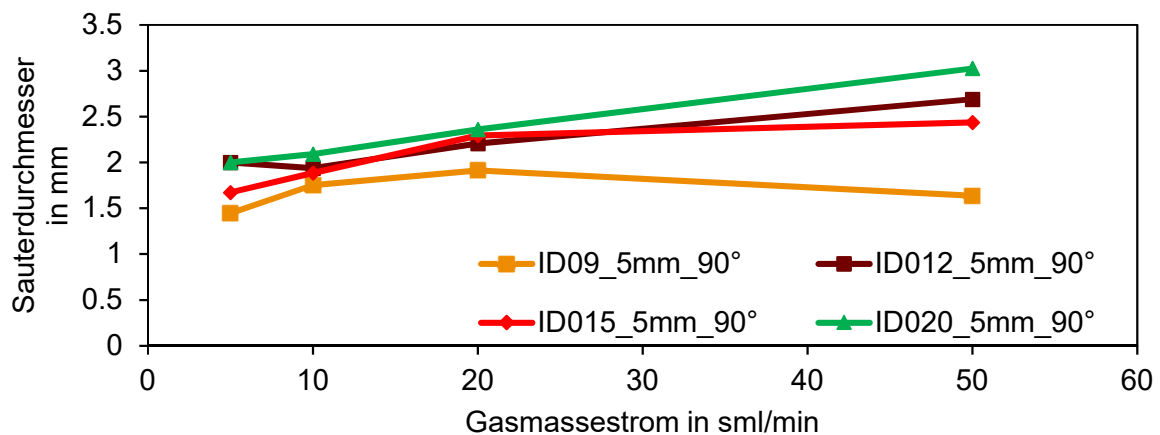


Abbildung 4.2: Abhängigkeit des Sauterdurchmessers vom Gasmassestrom für unterschiedliche Kanüleninnendurchmesser.

Wird der mittlere Sauterdurchmesser für den gleichen Volumenstrom bei steigendem Kanüleninnendurchmessern betrachtet, ist die leichte Blasengrößensteigerung sichtbar. Gleichzeitig sinkt mit größeren Kanüleninnendurchmessern der Druckverlust stark. Dargestellt ist dies in Abbildung 4.3. Dieses Verhalten ist bereits von kommerziellen Belüftern bekannt.

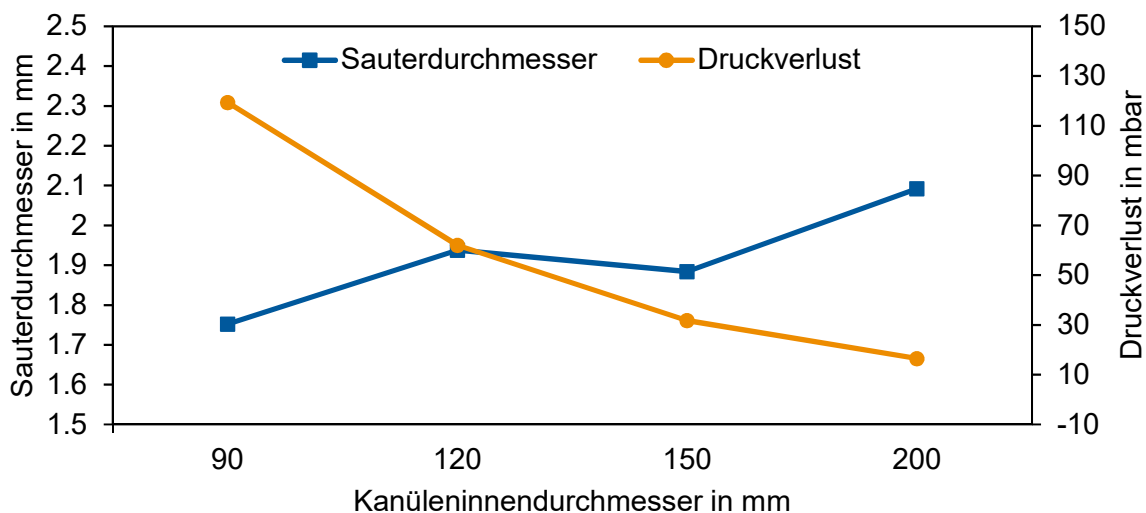


Abbildung 4.3: Sauterdurchmesser und Druckverlust bei der Blasenbildung an Kanülen mit 5 mm Länge mit einem Gasmassstrom von 10 sml/min in Abhängigkeit vom Kanüleninnendurchmesser.

Bei der Variation des Kanülenschliffs fallen die Änderungen im mittleren Sauterdurchmesser bei gleichen Gasdurchsätzen sehr gering aus. Für den Fall der Kanülen mit 120 µm Innendurchmesser und Schliffen von 30°, 60° und 90° sind die Sauterdurchmesser in Abbildung 4.4 dargestellt. Nur bei dem geringsten Volumenstrom in den Versuchen konnte eine merkliche Verkleinerung der Blasengrößen bei einem Schliff von 30° ermittelt werden. Eine Erklärung dafür können die auf die Blase wirkenden Kräfte sein, die sich durch den Schliff verändern und im Fall der Kanüle mit 30° Schliff zu einer schnelleren Blasenablösung führen. Jedoch ist festzustellen, dass dieser geringe Vorteil den hohen Fertigungsaufwand für den Kanülenschliff für einen Kanülenbelüfter nicht rechtfertigt.

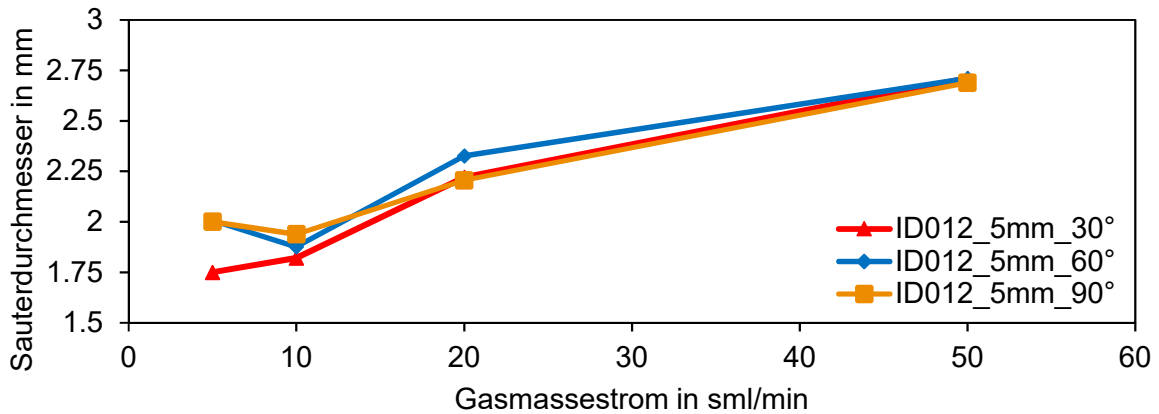


Abbildung 4.4: Abhängigkeit des Sauterdurchmessers vom Gasmassestrom bei der Blasenbildung aus Kanülen mit 30°, 60° bzw. 90° Schliff.

Der Effekt der beiden untersuchten Kanülenlängen von 5 und 15 mm ist in Abbildung 4.5 aufgezeigt. Mit längeren Kanülen sind bei 90° Schliff meistens geringfügig kleinere Sauterdurchmesser möglich. Jedoch steigt mit der Kanülenlänge der Druckverlust bei der Blasenbildung aufgrund der längeren Kanülen. Daher erscheinen kürzere Kanülen hydrodynamisch und energetisch günstiger.

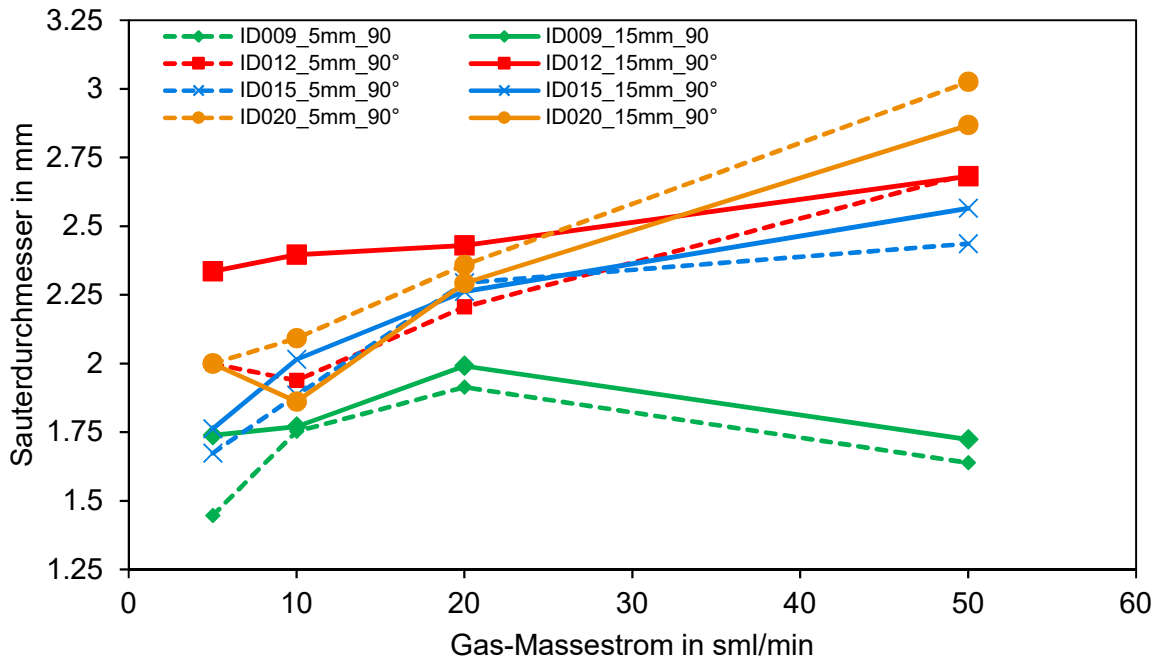


Abbildung 4.5: Abhängigkeit des Sauterdurchmessers vom Gasmassestrom bei der Blasenbildung aus Kanülen mit 5 bzw. 15 mm Länge.

4.1.2 Einzellöcher und Lochplatten

Bei den Einzellöchern ist das Verhalten bei der Blasenbildung ähnlich wie bei den Kanülen. Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera von Einzellochplatten sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Mit größeren Lochdurchmessern werden größere Blasen generiert. Eine Ursache dafür ist die geringere Blasenbildungsfrequenz bei größeren Lochdurchmessern.

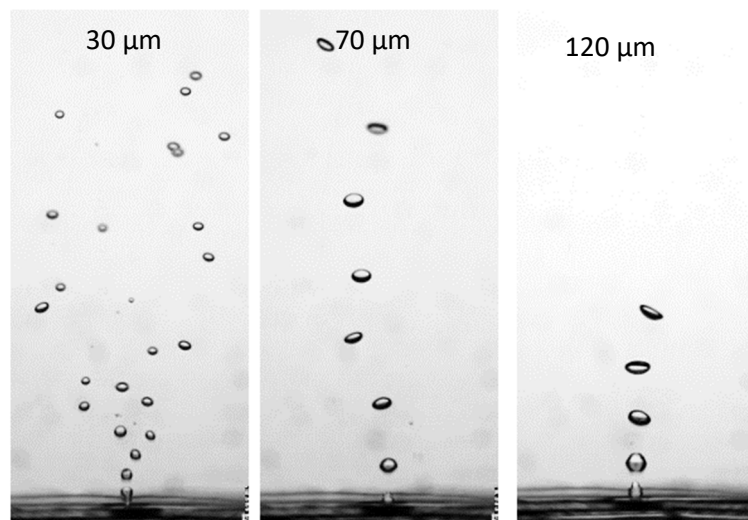


Abbildung 4.6: Blasenbildung von Einzellochplatten bei unterschiedlichen Lochdurchmessern und einem Gasmassstrom von 10 sml/min.

Weiterhin führt wie bei den Kanülen ein höherer Gasmassstrom zu einer Vergrößerung der mittleren Sauerdurchmesser (siehe Abbildung 4.7). Daher sind kleinere Lochdurchmesser besser geeignet, wenn das Ziel die kleinstmögliche Blasengröße ist. Jedoch steigt mit kleineren Lochdurchmessern auch hier der Druckverlust bei der Blasenbildung stark an. Dies ist in Abbildung 4.8 dargestellt. Von 200 bis 50 μm großen Löchern steigt der Druckverlust nur allmählich an und die Blasengröße sinkt kontinuierlich. Bei der Betrachtung von 30 und 50 μm großen Einzellöchern fällt der große Unterschied im Druckverlust und die im Vergleich nur geringe Änderung im mittleren Sauterdurchmesser auf. In diesem Fall ist davon auszugehen, dass Lochdurchmesser ab 50 μm energetisch besser sind im Vergleich zu kleineren Öffnungen.

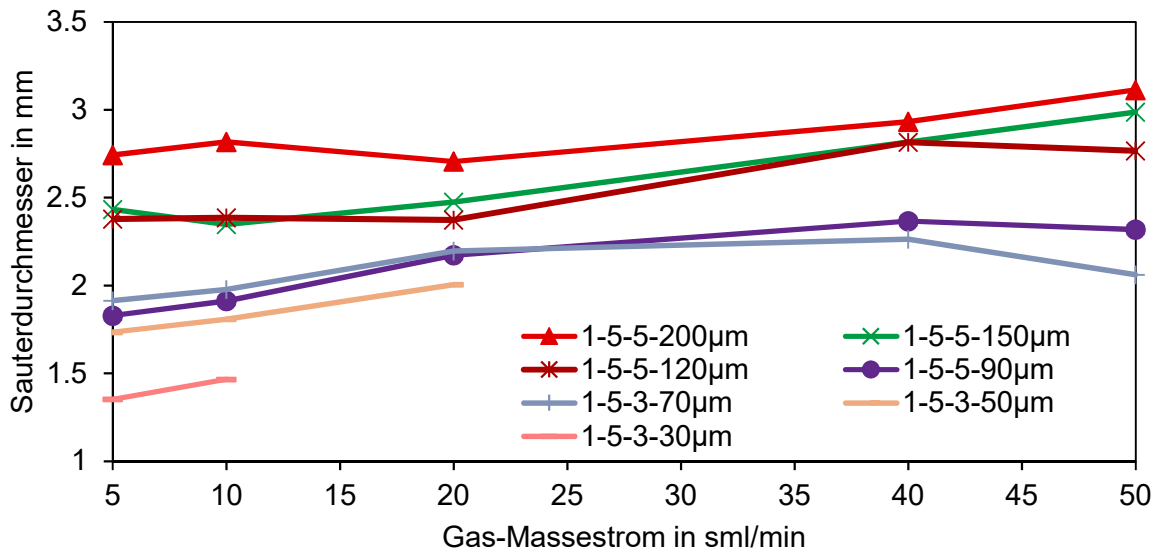


Abbildung 4.7: Sauterdurchmesser für Einzellochplatten bei unterschiedlichen Gas-masseströmen.

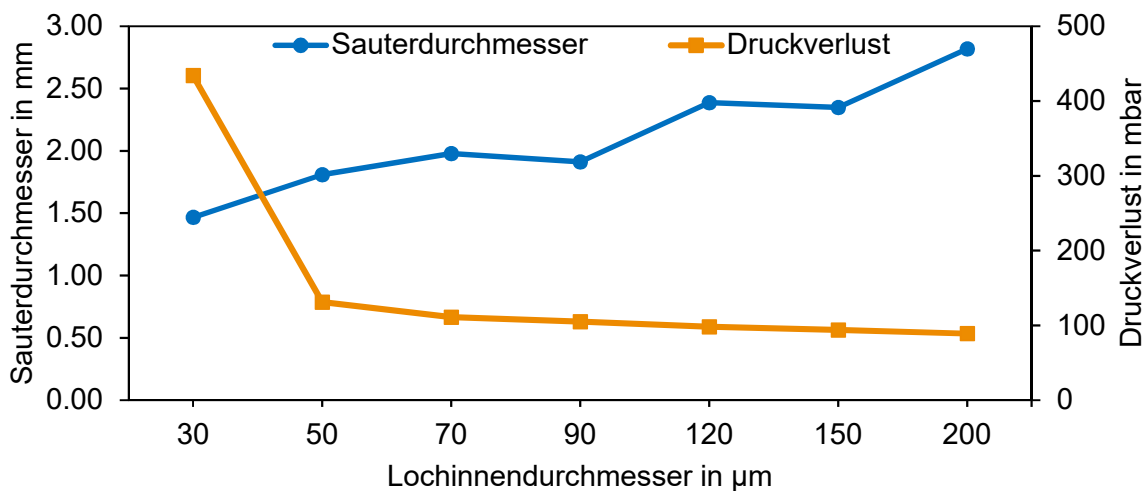


Abbildung 4.8: Druckverlust und Sauterdurchmesser bei Einzellochplatten in Abhängigkeit vom Lochinnendurchmesser für 10 sml/min Gasmassestrom.

Die Sauterdurchmesser der Lochplatten mit 11 Löchern bestätigen weitestgehend die Ergebnisse der Einzellöcher. Mit höheren Gasmasseströmen und Lochdurchmessern steigt der mittlere Sauterdurchmesser an (Abbildung 4.9). Jedoch ist bei den Ergebnissen zu beachten, dass die Blasenbildung an den 11 Löchern nicht gleichmäßig ist. Aufgrund geringfügiger Fertigungsunterschiede können an einzelnen Löchern der Lochplatte unterschiedliche Druckverluste auftreten. Dies führt zu einer inhomogenen Verteilung der Druckluft an die 11 Löcher. Daher sind auch kleinere Blasen möglich.

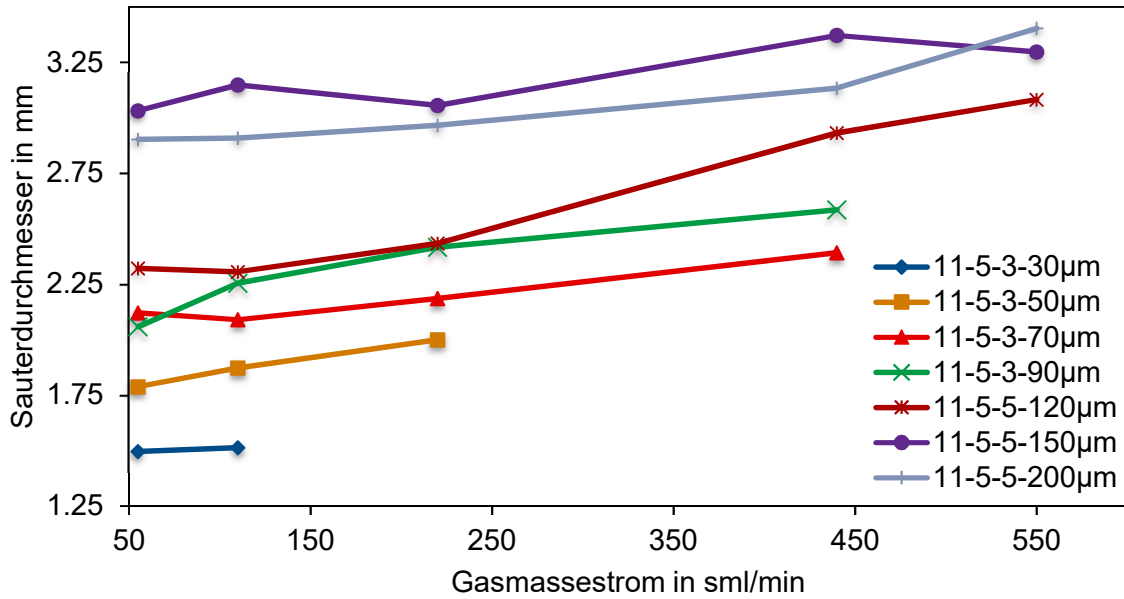


Abbildung 4.9: Sauterdurchmesser für Lochplatten mit 11 Löchern bei unterschiedlichen Gasmasseströmen.

Weiterhin wurden die Effekte von Plattendicke, Oberflächenbeschaffenheit und Lochabstand auf die Blasengrößen untersucht. Für den Effekt der Plattendicke wurden zwei Plattendicken verwendet – 300 und 500 µm. Fertigungsbedingt war diese Variation nicht für jeden Lochdurchmesser möglich. In Abbildung 4.10 ist ein Vergleich der mittleren Sauterdurchmesser von zwei unterschiedlich dicken Platten dargestellt. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die dünnere Platte für kleinere Sauterdurchmesser sorgt.

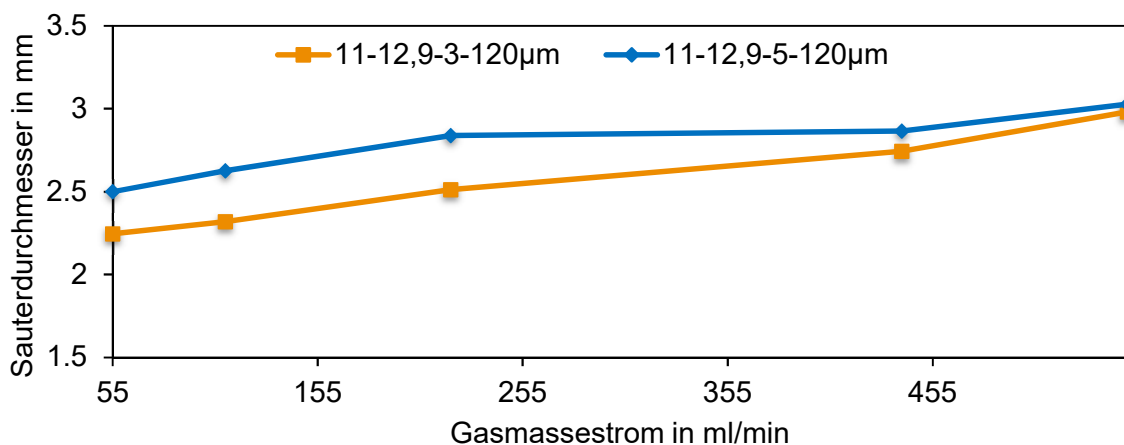


Abbildung 4.10: Einfluss der Plattendicke von Lochplatten auf den Sauterdurchmesser in Abhängigkeit vom Gasmassestrom.

Die Lochplatten wurden mit 5 und 12,9 mm Lochabstand gefertigt und der Effekt des Lochabstandes auf die Blasengrößen untersucht. Im Diagramm in Abbildung 4.11 sind die resultierenden mittleren Sauterdurchmesser über den untersuchten Gasmassstrombereich dargestellt. Dabei fällt der große Unterschied bei den niedrigeren Masseströmen auf. Die Blasen von Löchern mit kleineren Abstand zueinander sind ca. 0,4 mm kleiner als die Blasen von Löchern mit 12,9 mm Abstand. Eine mögliche Ursache dafür ist der größere Einfluss von Flüssigkeitsströmungen durch die Blasenbildung und den Blasenanstieg der benachbarten Löcher. Der Einfluss der Flüssigkeitsströmungen ist durch den kürzeren Abstand größer. Jedoch sollte der Lochabstand nicht zu gering gewählt werden, da sonst die Wahrscheinlichkeit von Blasenkoaleszenz an den Löchern steigt und somit zu deutlich größeren Blasen führen würde.

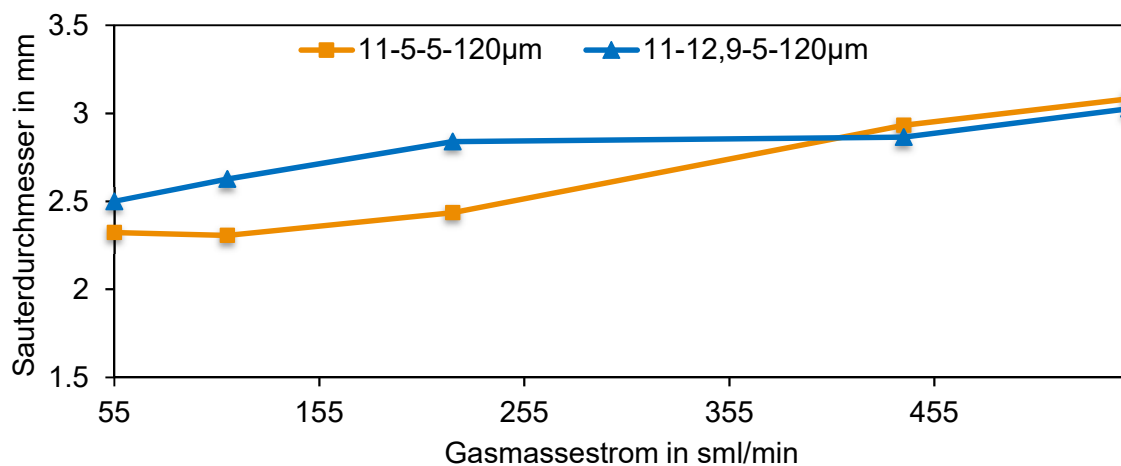


Abbildung 4.11: Einfluss des Lochabstandes von Lochplatten auf den Sauterdurchmesser bei der Blasenbildung in Abhängigkeit vom Gasmassstrom.

Als letzter Effekt auf die Blasengröße bei der Blasenbildung von Lochplatten wurde der Einfluss von Oberflächenrauigkeit und Oberflächenkontaktwinkel auf die resultierende Blasengröße untersucht. Dazu wurden die Blasengrößen von unpolierten und elektrolierten Lochplatten untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.12 dargestellt. Die Blasengrößen der polierten Lochplatten sind geringer als die der unpolierten Lochplatten. Die Bearbeitung der Oberfläche und somit die Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit haben einen entscheidenden Einfluss auf die resultierenden Blasengrößen in Reinstwasser. Dies ist mit dem geringeren Kontaktwinkel bei geringerer Oberflächenrauigkeit zu erklären.

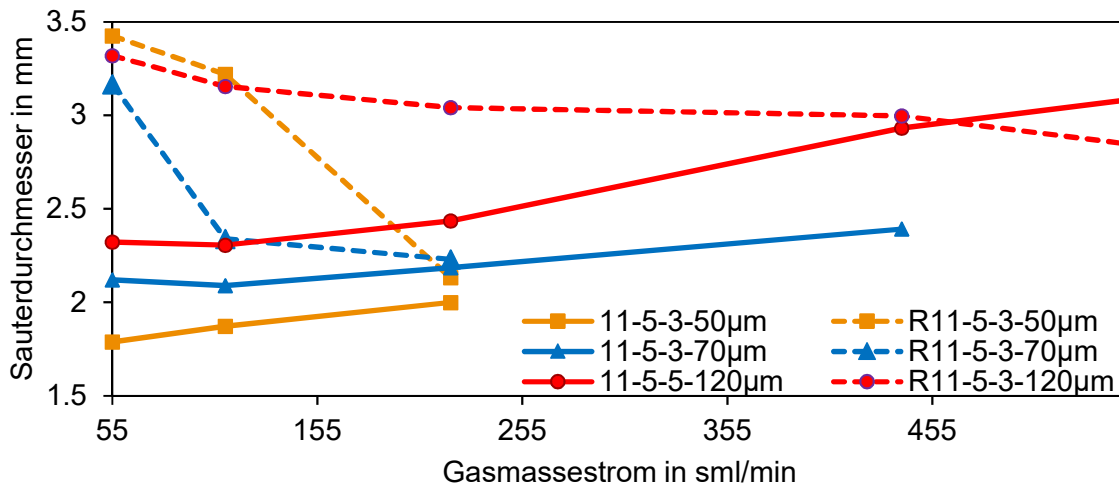


Abbildung 4.12: Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Sauterdurchmesser bei der Blasenbildung von Lochplatten in Abhängigkeit vom Gasmassestrom.

4.1.3 Vergleich und Fazit

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Untersuchungen für Kanülen, Einzellöchern und Lochplatten mit 11 Löchern dargestellt. In diesem Abschnitt werden die Blasengrößen der einzelnen Varianten miteinander verglichen und ein Fazit gezogen. Im Diagramm in Abbildung 4.13 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 (vgl. Abschnitt 2.1.2). 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.

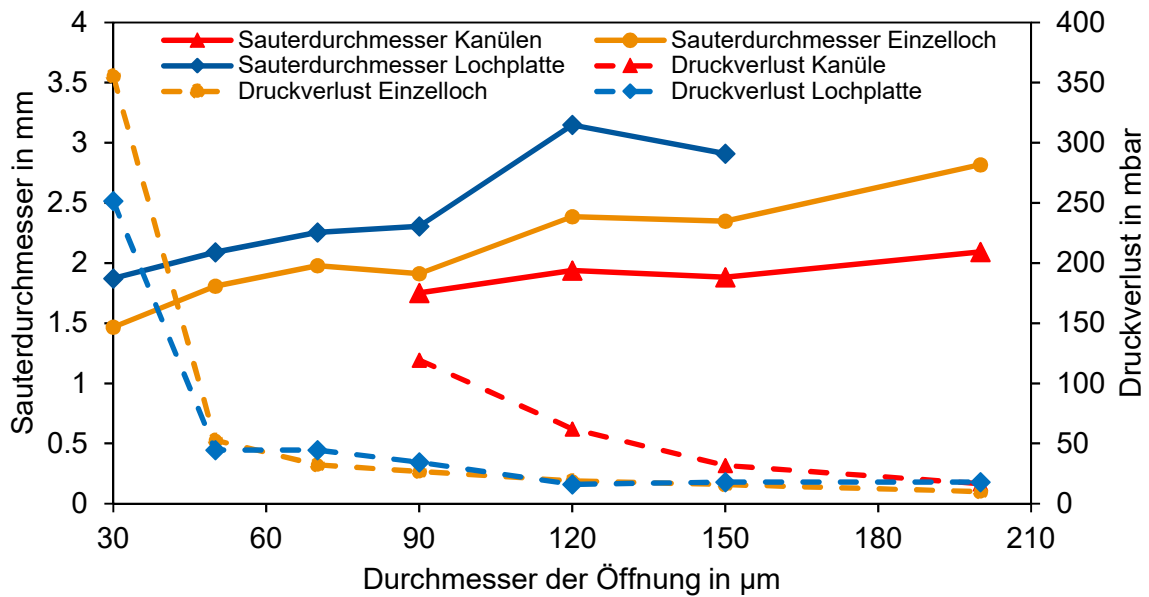


Abbildung 4.13: Vergleich der Sauterdurchmesser und des Druckverlustes bei Blasenbildung mit Kanülen, Einzellöchern und Lochplatten (5 mm Lochabstand) in Abhängigkeit vom Lochdurchmesser für einen Gasvolumenstrom von 10 sml/min pro Öffnung.

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 (vgl. Abschnitt 2.1.2). 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 Sauerstoffeintrag

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, welche in Abschnitt 3.2.3 beschrieben ist. 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.

4.2.1.1 Tellerbelüfter

Zunächst werden die Untersuchungsergebnisse für jeweils nur einen Tellerbelüfter betrachtet. Die in der Abbildung 4.14 gezeigten Verläufe der spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr lassen erkennen, dass der Tellerbelüfter 5 die höchsten *SSOTR*-Werte erzielt. Lediglich bei den Versuchen mit $1,0 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$, konnte der Tellerbelüfter 1 einen höheren *SSOTR*-Wert erzielen. Der Tellerbelüfter 6 besitzt, trotz der größten Abgasfläche, gegenüber den anderen Modellen die kleinsten und am stärksten schwankenden *SSOTR*-Werte. Weiterhin besitzt dieses Belüftungselement sowie der Tellerbelüfter 2 im Vergleich zu den anderen Belüftern die geringste Lochanzahl. Den Verläufen nach, lässt sich ein direkter Einfluss der Lochanzahl auf den *SSOTR* erkennen. Je größer die Lochanzahl ist, desto mehr Blasen können gebildet werden. Dies begünstigt den Stofftransport und bestätigt die Erkenntnisse von Wagner (2002).

Bei der Betrachtung der in Abbildung 4.15 dargestellten Druckverluste wird deutlich, dass dieser mit zunehmendem Gasmassstrom zunimmt. Der höchste Druckverlust

ist bei dem Tellerbelüfter 4 zu verzeichnen. Die Tellerbelüfter 2, 3 und 6 weisen hingegen nur geringe Druckverlustwerte auf.

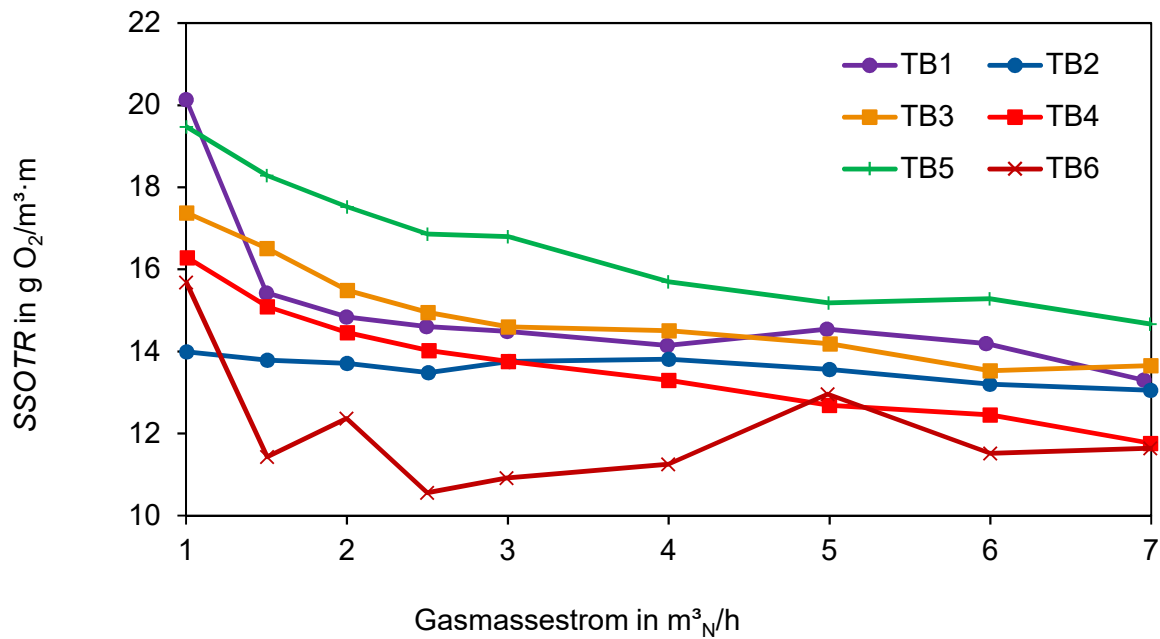


Abbildung 4.14: Verlauf der Spezifische Standard-Sauerstoffzufuhr für je einen Tellerbelüfter.

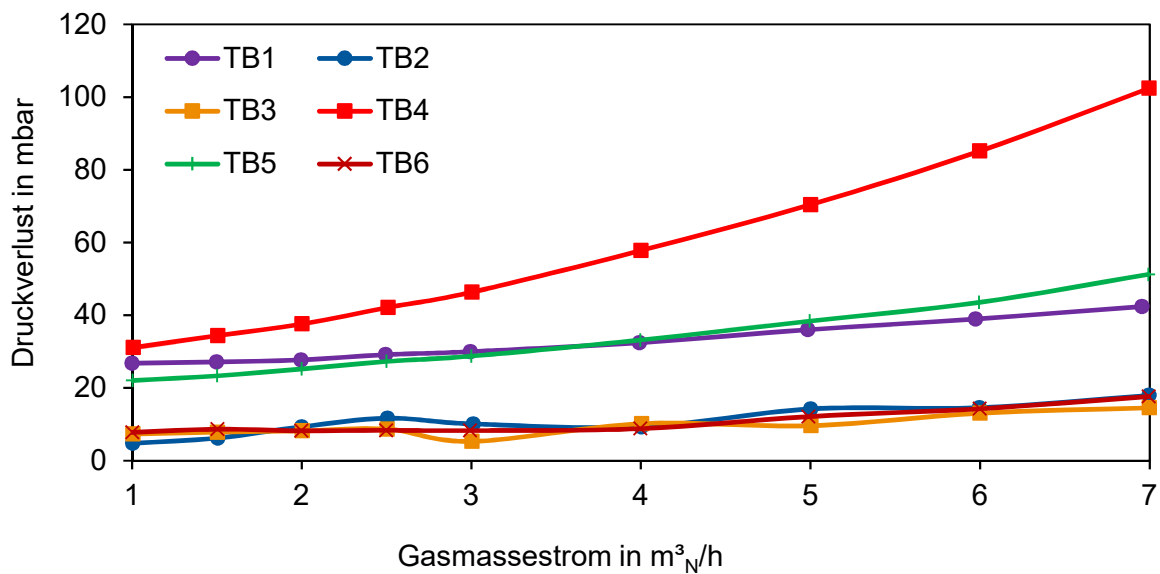


Abbildung 4.15: Verlauf des Druckverlustes für je einen Tellerbelüfter.

Laut Wagner (2002) ist der Druckverlust geringer, je mehr und größere Schlitze vorhanden sind. Dieses Ergebnis bestätigt sich aus den erfassten Daten nur bedingt. Tellerbelüfter 6, welcher die geringste Lochanzahl besitzt, weist einen vergleichsweise

geringen Druckverlust auf. Das bedeutet, dass ebenfalls die Membrangröße sowie deren Beschaffenheit und der Grundkörper der Elemente maßgeblichen Einfluss auf den Druckverlust nehmen. So verändern sich Lochquerschnitt und Lochkanallänge in Abhängigkeit von der Membrandicke und Membranmaterial. Weiterhin könnten Verengungen im Belüftergrundkörper, wie etwa Rückschlagventile, den Druckverlust erhöhen.

Für die energetische Bewertung der Tellerbelüfter sind in Abbildung 4.16 die Verläufe des Sauerstofftrages pro Abgasfläche abgebildet. Es ist zu erkennen, dass der Sauerstofftrag wie auch die spezifische Standard-Sauerstoffzufuhr, bei geringeren Gasmasseströmen zunimmt. Weiterhin ist zu verzeichnen, dass trotz des größten Druckverlustes und einem gegenüber den anderen Belüftern mittleren *SSOTR*-Wert Tellerbelüfter 4 den höchsten Sauerstofftrag aufweist. Das heißt, dass mit diesem Modell am effizientesten Sauerstoff in Reinstwasser eingetragen werden kann.

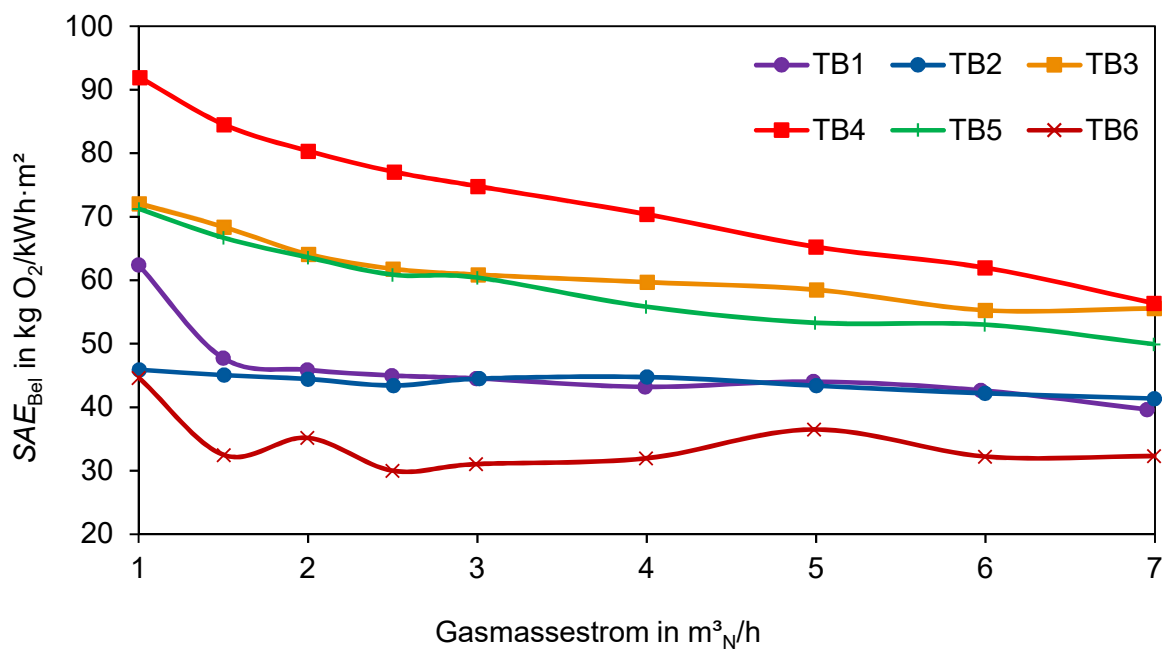


Abbildung 4.16: Verlauf des Sauerstofftrages für je einen Tellerbelüfter.

Weiterhin wurden Experimente durchgeführt, bei denen für je drei Tellerbelüfertypen jeweils zwei baugleiche Tellerbelüfter (vgl. Abbildung 3.6) verbaut und somit die Abgasfläche verdoppelt wurde. Die Ergebnisse für den in Abbildung 4.17 dargestellten *SSOTR* zeigen, dass der höchste *SSOTR* durch zwei Belüfter des TB4 erzielt wird. Für den TB3 hat ein zweites Element eine Verringerung des *SSOTR*-Wertes zur Folge.

Bei dem TB5 wird nur bei geringen Gasmasseströmen mit zwei Belüftern ein schlechteres Ergebnis erzielt. Damit widerspricht dieses Ergebnis den Angaben von Frey (1996), Pöpel et. al (1998) und Wagner (2002), bei denen eine höhere Belegungsdichte stets eine erhöhte Sauerstoffzufuhr mit sich bringt. Ursache für den schlechteren SSOTR bei TB3 und TB5 ist der geringere Massenstrom pro Belüfter. Dieser bewirkt, dass nicht alle Löcher der Membran geöffnet sind. Die Folge sind höhere Gasvolumenströme an den geöffneten Schlitzen und eine inhomogenere Gasblasenverteilung. Dies beeinflusst letztlich den Stofftransport und somit auch den Sauerstofftrag negativ. Der TB4 hat aufgrund der geringeren Abgasfläche und der geringeren Lochanzahl weniger Probleme bei der Belüftung mit geringen Gasmasseströmen.

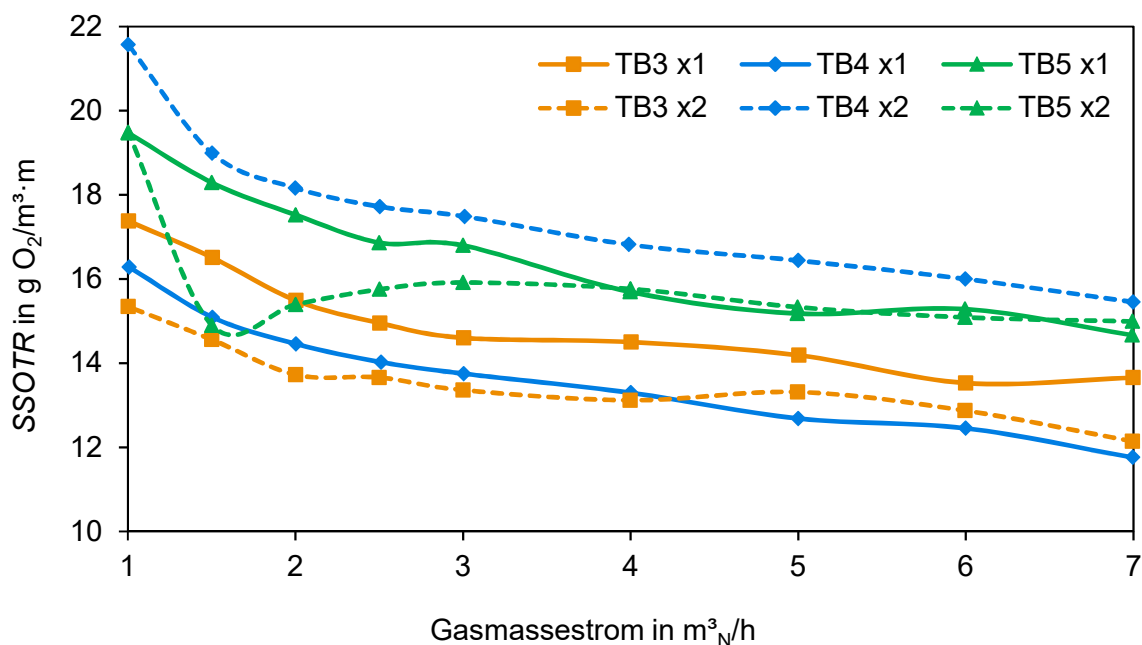


Abbildung 4.17: Gegenüberstellung des Verlaufes der Spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr für einen (x1) und zwei (x2) Tellerbelüfter.

Wird der in Abbildung 4.18 dargestellte Druckverlust betrachtet, so ist zu erkennen, dass dieser bei der Verwendung von zwei Belüftern geringer ist. Dies ist mit der vergrößerten Abgasfläche und erhöhten Lochanzahl zu begründen und entspricht den Aussagen von Wagner (2002). Eine große Druckdifferenz gegenüber der Verwendung einzelner Belüfter zeigt sich besonders bei hohen Volumenströmen.

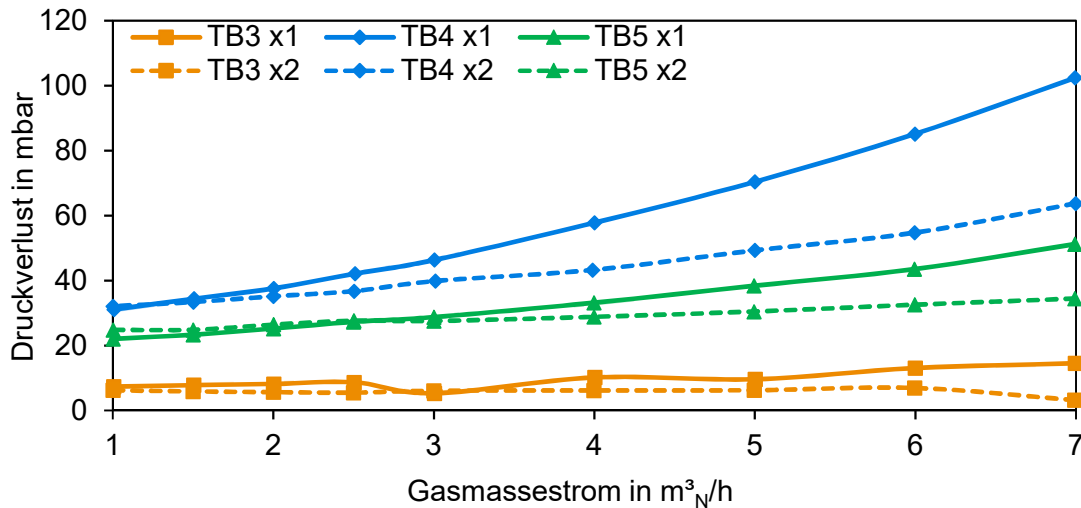


Abbildung 4.18: Gegenüberstellung des Verlaufes des Druckverlustes für einen und zwei Tellerbelüfter.

Bei der Betrachtung des Sauerstoffertes bezogen auf die Abgasfläche in Abbildung 4.19 ist zu erkennen, dass dieser bei der Verwendung von zwei Elementen stets geringer ist. Trotz des geringeren Druckverlustes ist der Ertrag pro Abgasfläche niedriger, da im Falle von TB3 und TB5 die SSOTR-Werte geringer sind als mit einem Belüfter und im Falle von TB4 der SSOTR nicht linear mit der Abgasfläche steigt.

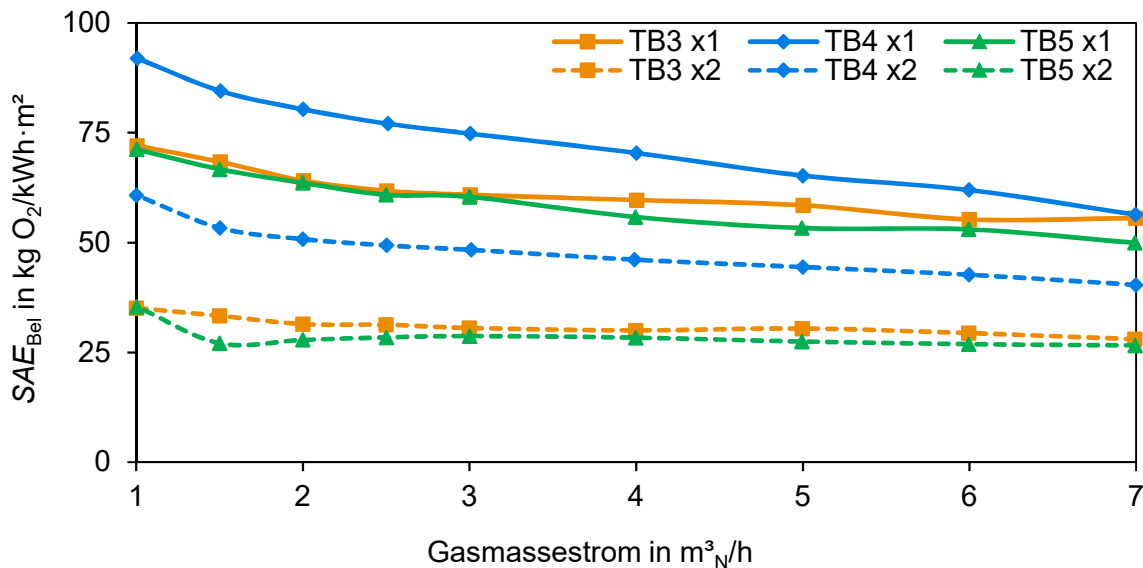


Abbildung 4.19: Gegenüberstellung des Verlaufes des Sauerstoffertes bezogen auf die Abgasfläche für einen und zwei Tellerbelüfter.

4.2.1.2 Rohrbelüfter

Nachfolgend werden die Untersuchungsergebnisse der Rohrbelüfter vorgestellt. Bei der Betrachtung des in Abbildung 4.20 dargestellten Verlaufs des *SSOTR* wird deutlich, dass der Rohrbelüfter 1 die höchste spezifische Standard-Sauerstoffzufuhr aufweist. Dieses Ergebnis konnte trotz der geringeren Lochanzahl und Abgasfläche gegenüber den Rohrbelüftern 2 und 3 erzielt werden.

Bei steigendem Gasmassestrom nimmt der Druckverlust nur geringfügig zu (siehe Abbildung 4.21). Hierbei weist RB2 gegenüber den anderen Rohrbelüftern den größten Druckverlust auf.

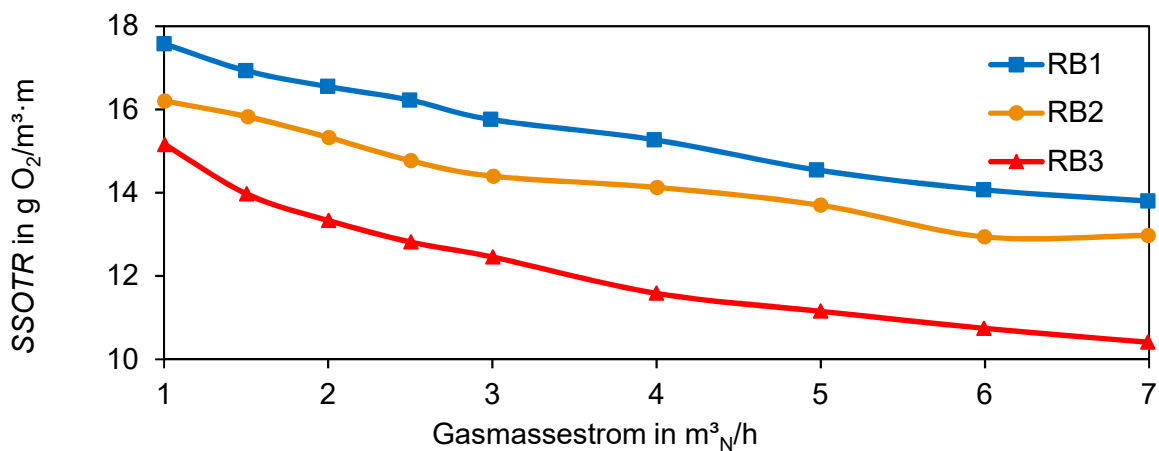


Abbildung 4.20: Verlauf der Spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr der Rohrbelüfter.

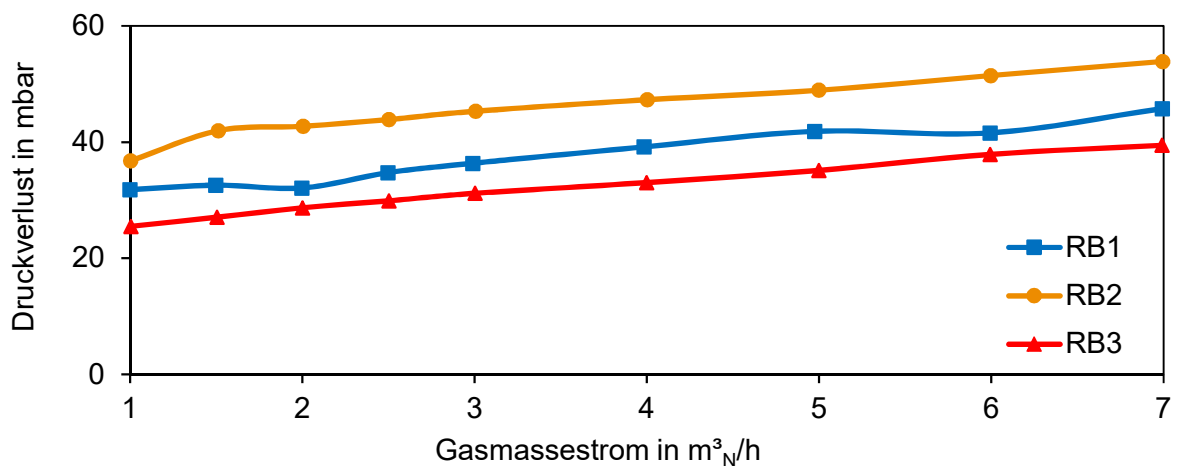


Abbildung 4.21: Verlauf des Druckverlustes der Rohrbelüfter.

Der in Abbildung 4.22 dargestellte Sauerstofftrag zeigt einen dem *SSOTR* ähnlichen Kurvenverlauf auf. Der kleinere Rohrbelüfter 1 erreicht den höchsten *SAE_{Bel}* im Vergleich zwischen der Rohrbelüftern.

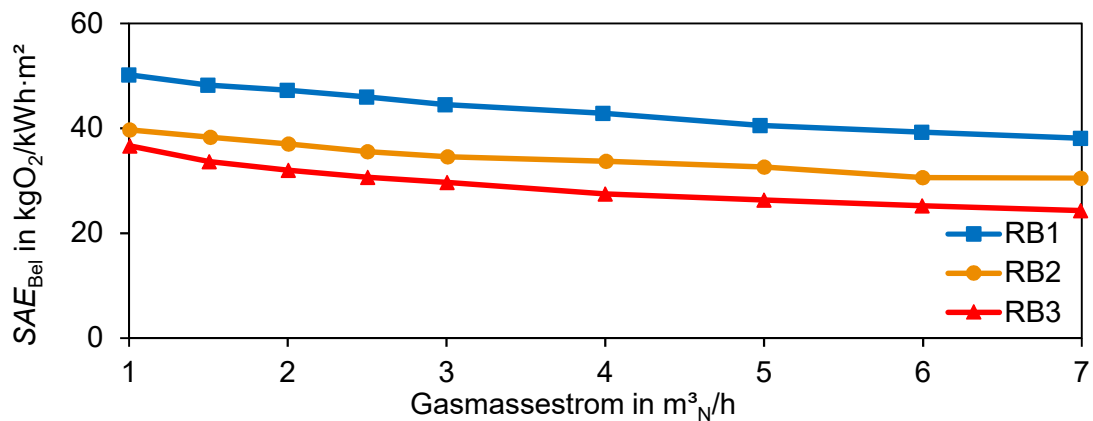


Abbildung 4.22: Verlauf des Sauerstofftrages der Rohrbelüfter.

4.2.1.3 Platten- und Edelstahlbelüfter

Nachfolgend werden die Messergebnisse des Plattenbelüfters sowie die der Edelstahlbelüfter gegenübergestellt. Die Edelstahlbelüfter wurden hierfür in einer Zeile nach Variante 1 (vgl. Abbildung 3.7) montiert. Die Verläufe des in der Abbildung 4.23 dargestellten SSOTR zeigen kann trotz kleinerer Abgasfläche deutlich höhere Werte für die Edelstahlbelüfter EB1, EB2 und EB3 gegenüber dem Plattenbelüfter 1. Weiterhin ist zu erkennen, dass mit kleineren Lochgrößen und geringeren Gasmasseströmen der SSOTR-Wert für die Edelstahlbelüfter zunimmt. Dies bestätigt die Annahme, dass kleine Luftblasen aufgrund der größeren Stoffaustauschfläche den Stoffübergang begünstigen.

Wie aus den videometrischen Voruntersuchungen bekannt ist, sorgen kleinere starre Öffnungen an den Edelstahlbelüftern für kleinere Blasen und der Druckverlust steigt. Dieses Verhalten wird auch in der Technikumsanlage bestätigt (Abbildung 4.24).

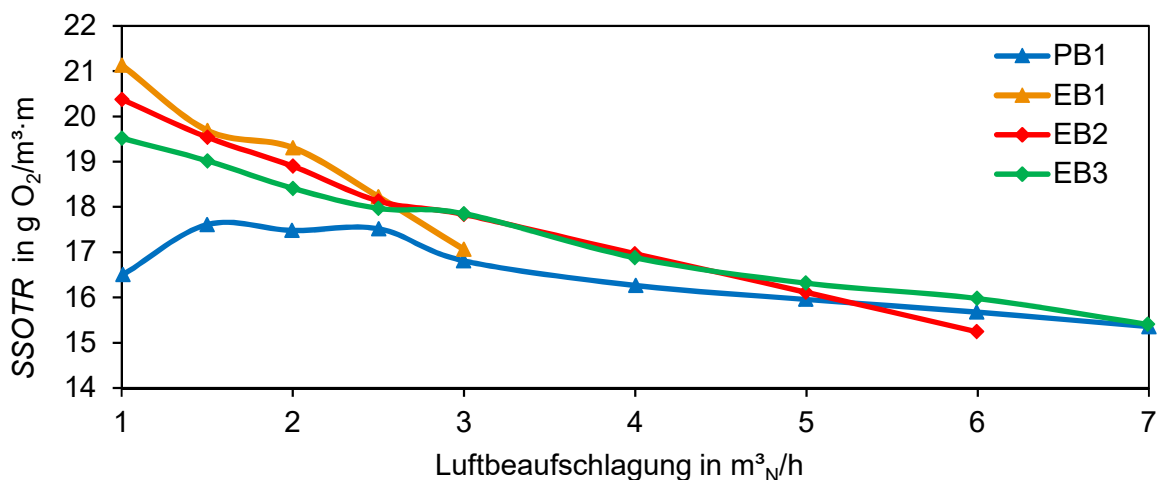


Abbildung 4.23: Verlauf der Spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr des Platten- und der Edelstahlbelüfter.

Es ist mit steigendem Gasmassestrom ein höherer Druckanstieg bei den Edelstahlbelüftern gegenüber dem Plattenbelüfter zu verzeichnen, welcher jedoch durch den gesteigerten Sauerstofftrag überkompensiert wird. Der für die derzeitige technische Ausführungsform der Edelstahlbelüfter gesetzte Grenzwert von 160 mbar führt zu einem maximalen Gasmassestrom der genutzten Labormuster von ca. 3 m³/h für EB1 und ca. 6 m³/h für EB2. Eine Reduktion des Druckverlustes für vergleichbare Gasmasseströme ist durch eine angepasste Auslegung des Belüftungssystems mit einem höheren Materialaufwand für EB gegenüber konventionellen Belüftern erreichbar.

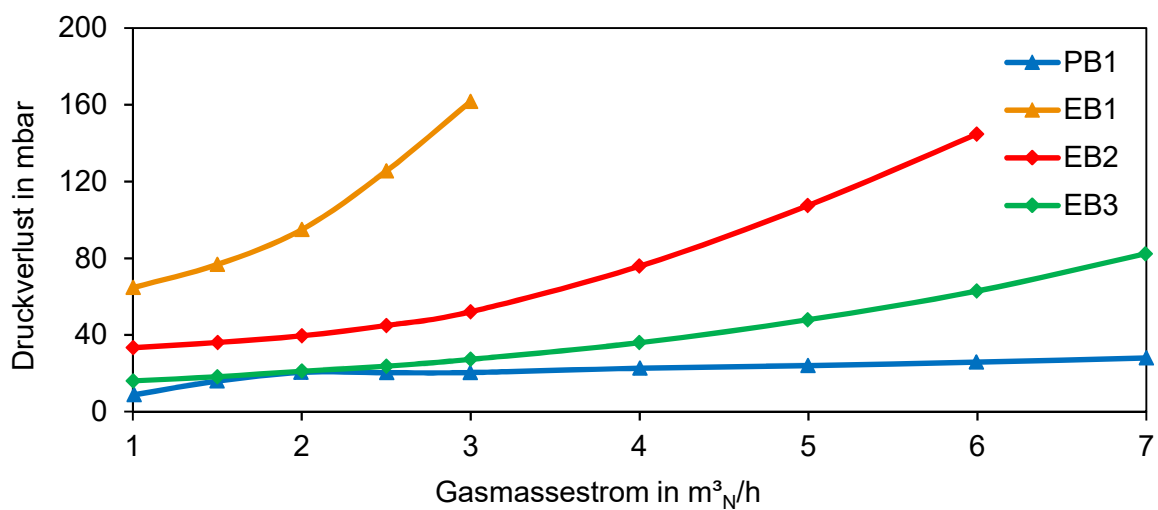


Abbildung 4.24: Verlauf des Druckverlustes des Platten- und der Edelstahlbelüfter.

Der Sauerstofftrag ist bei allen Edelstahlbelüftern deutlich höher als bei dem Plattenbelüfter 1. Die Belüfter mit dem Lochdurchmesser von 70 µm weisen hierbei die höchsten Sauerstofftragswerte auf.

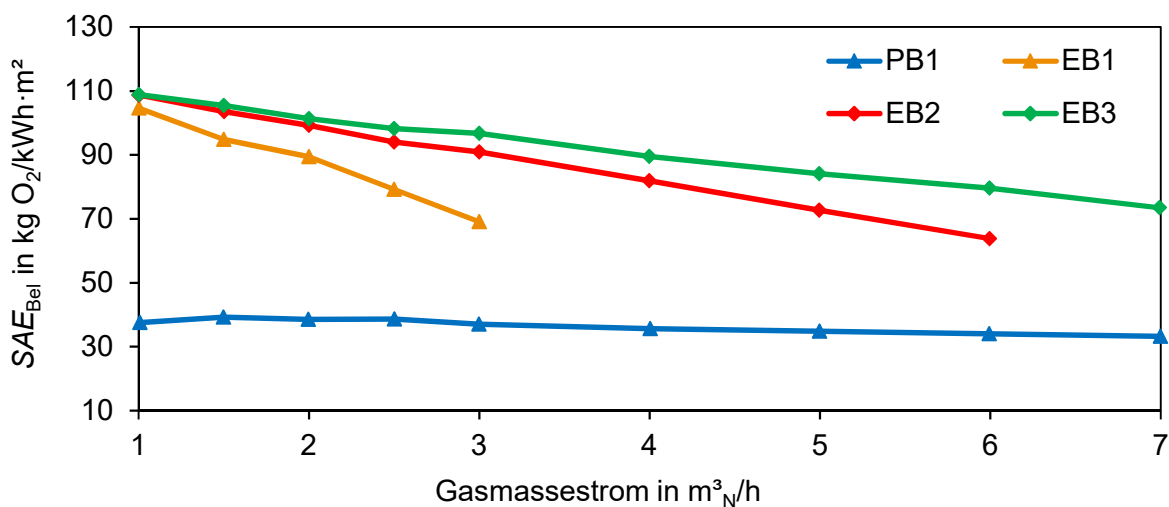


Abbildung 4.25: Verlauf des Sauerstofftrages des Platten- und der Edelstahlbelüfter.

Der in Abbildung 4.25 dargestellte Sauerstofftrag zeigt, dass bei der Verwendung von Edelstahlbelüftern eine Energieeinsparung bei gegenüber dem Plattenbelüfter 1 möglich ist. Trotz des hohen Druckverlustes tragen diese deutlich mehr Sauerstoff ein. Mit zunehmendem Gasmassestrom verringert sich der Einspareffekt der Belüfter.

Für die Bewertung der unterschiedlichen Anordnungen der Edelstahlbelüfter, wurden ausschließlich Versuche mit den Edelstahlbelüftern EB3 durchgeführt. Die Abbildung 4.26 zeigt hierfür die spezifische Standard-Sauerstoffzufuhr der in Reihe geschalteten Variante 1, sowie der symmetrisch angeordneten Varianten 2 und 3 (vgl. Abbildung 3.7). 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.

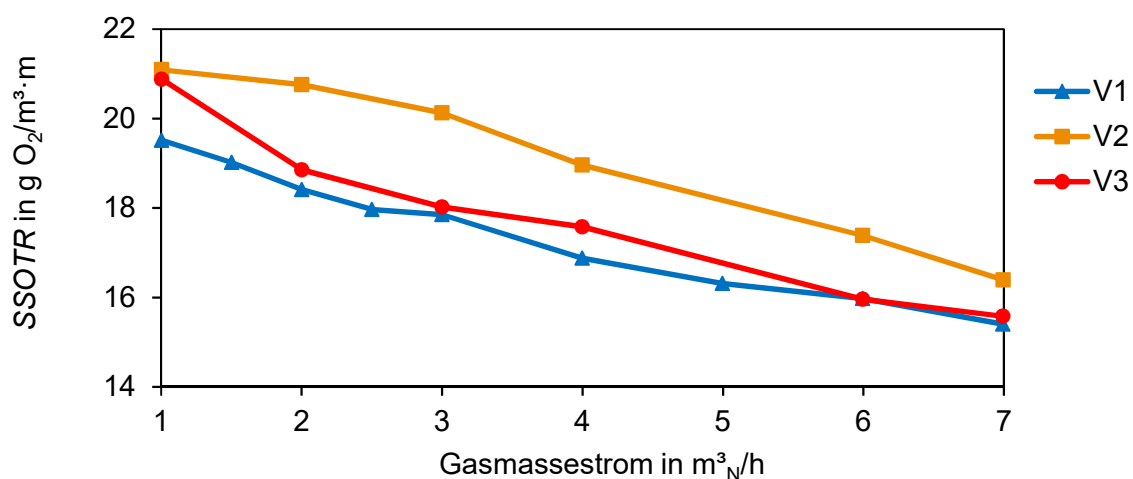


Abbildung 4.26: Gegenüberstellung des Verlaufes der Spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr der Edelstahlbelüfter EB3 mit Variation der Anordnung.

Dieses Ergebnis deutet auf eine bessere Initialverteilung der Blasen durch die homogenere Belüfteranordnung hin.

Auswahl energetisch effizientester Belüftungselemente

Die Verläufe des *SSOTR* und des *SAE_{Bel}* zeigen, dass bei allen untersuchten Belüftern die höchsten Werte bei niedrigen Gasmasseströmen 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 4.27 zeigt den Teller-, Rohr- sowie Plattenbelüfter und die drei Edelstahlbelüfter (nach Variante 1) mit den höchsten SAE_{Bel} -Werten.

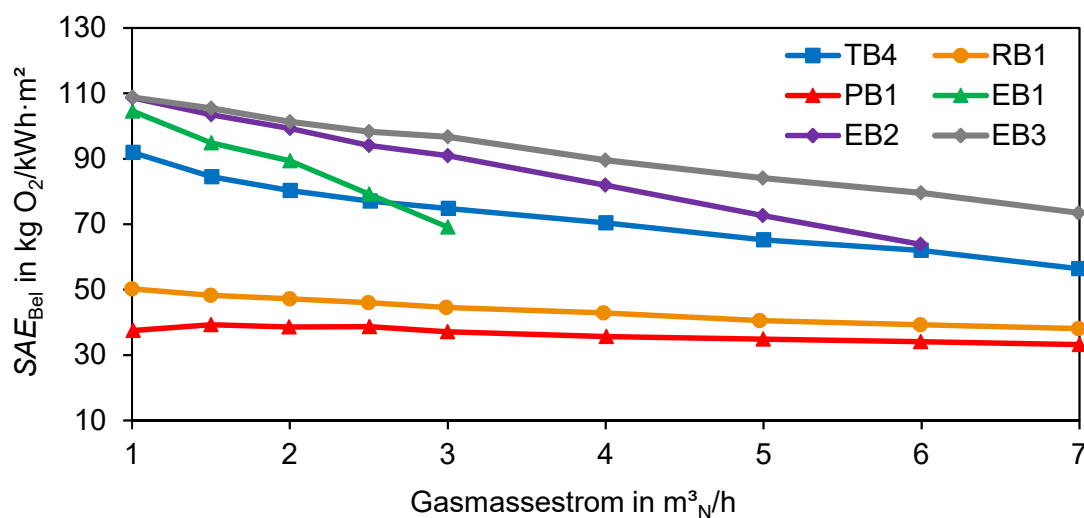


Abbildung 4.27: Gegenüberstellung des Sauerstoffertrages der effektivsten Belüftungselemente nach Belüftertyp.

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 4.28 dargestellten $SSOTR$ -Werte gestützt.

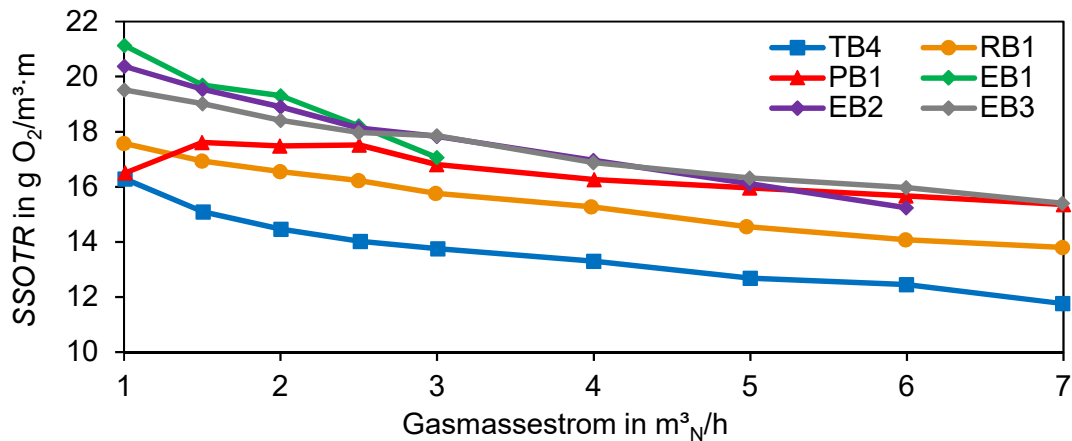


Abbildung 4.28: Gegenüberstellung der Spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr der in Abhängigkeit des Sauerstoffertrages effektivsten Belüftungselemente.

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.

4.2.2 Sauerstoffeintrag in salzhaltiges Wasser

Mit der 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 4.29 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.

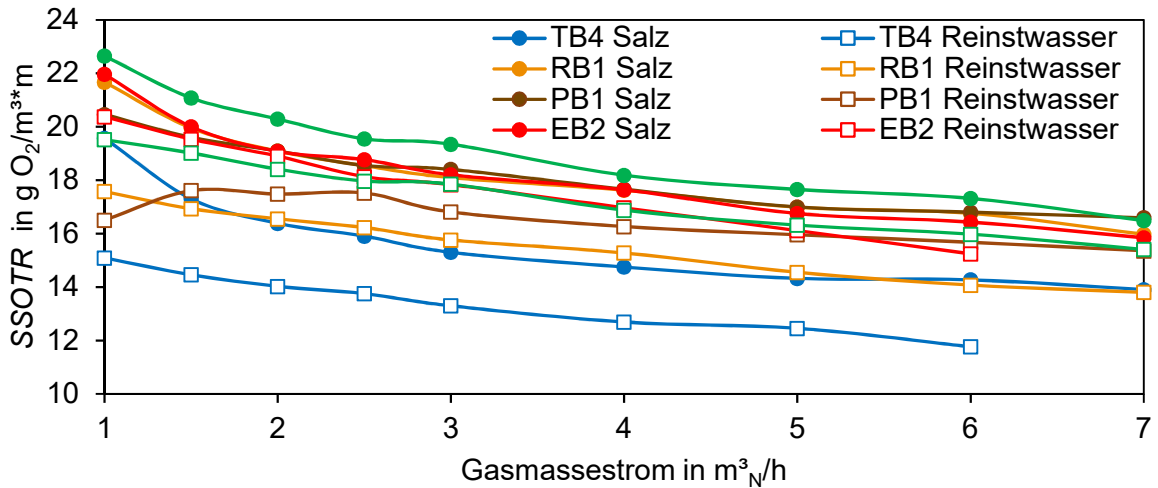


Abbildung 4.29: Gegenüberstellung der spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr der Belüfter im entionisiertem und salzversetztem Wasser mit $C_{Na_2SO_4} = 0,5 \text{ g/l}$.

Das Ergebnis entspricht den Erwartungen, dass die Salze eine koaleszenzhemmende Wirkung besitzen und somit den mittleren Blasendurchmesser und die Blasenaufliegsgeschwindigkeit 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 4.30 dargestellten Sauerstofferrtrages wird gezeigt, dass die Zugabe von Salz diesen ebenfalls bei allen untersuchten Belüftern erhöht.

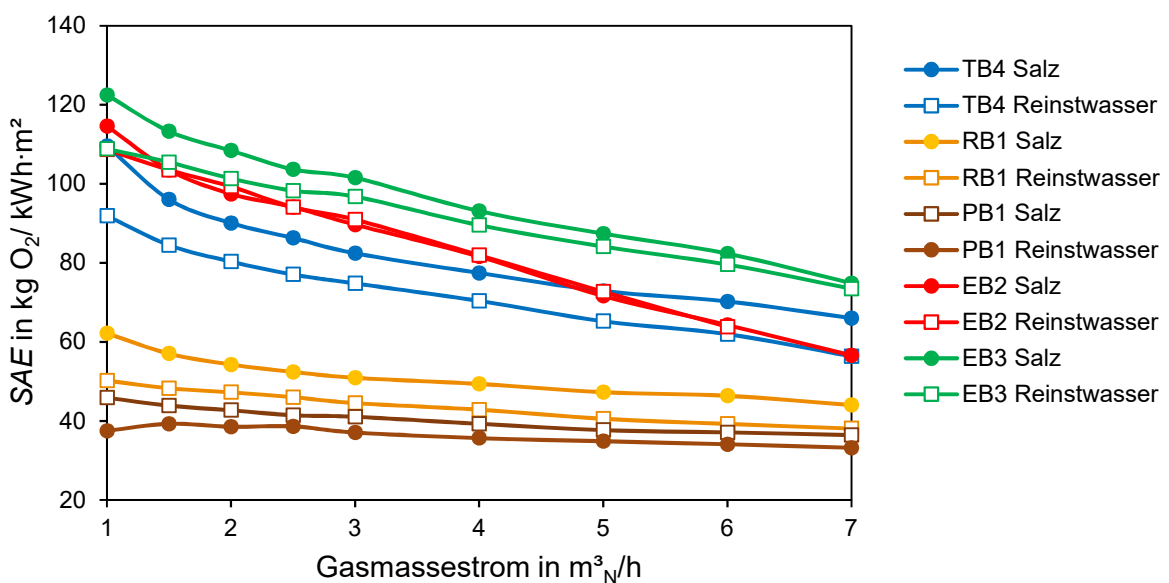


Abbildung 4.30: Gegenüberstellung des Sauerstofferrtrages der Belüftungselemente im entionisiertem und salzversetztem Wasser mit $C_{Na_2SO_4} = 0,5 \text{ g/l}$.

Werden die in der Abbildung 4.31 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 Sauerstofftrag wird diese Druckerhöhung jedoch durch die höhere Standard-Sauerstoffzufuhr überkompensiert.

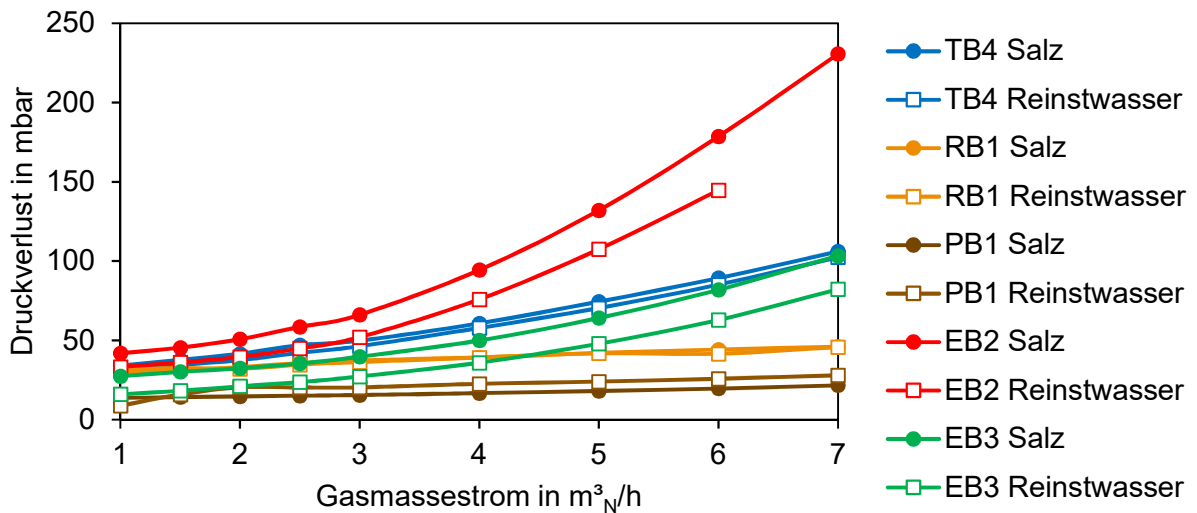


Abbildung 4.31 Gegenüberstellung des Druckverlustes der Belüftungselemente im entionisiertem und salzversetztem Wasser mit $C_{Na_2SO_4} = 0,5 \text{ g/l}$

4.2.3 Sauerstoffeintrag in Belebtschlamm

Für die Versuche mit Belebtschlamm wurde die reduzierte Belüfterauswahl wie schon in den Versuchen in salzversetzten Wasser genutzt. Die Gasmasseströme lagen dabei im Bereich von 1,5 bis 4 m³_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 4.32).



Abbildung 4.32: Edelstahlbelüfter auf Schlitten nach komplettem Durchlauf der Sauerstoffeintragsversuche.

In Abbildung 4.33 sind die Verläufe der Standard-Sauerstoffzufuhr in Reinstwasser und Belebtschlamm über dem Gasmassstrom aufgetragen. Erwartungsgemäß ist die Sauerstoffzufuhr in Schlamm schlechter als in Reinstwasser und damit auch schlechter als in salzversetzten 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.

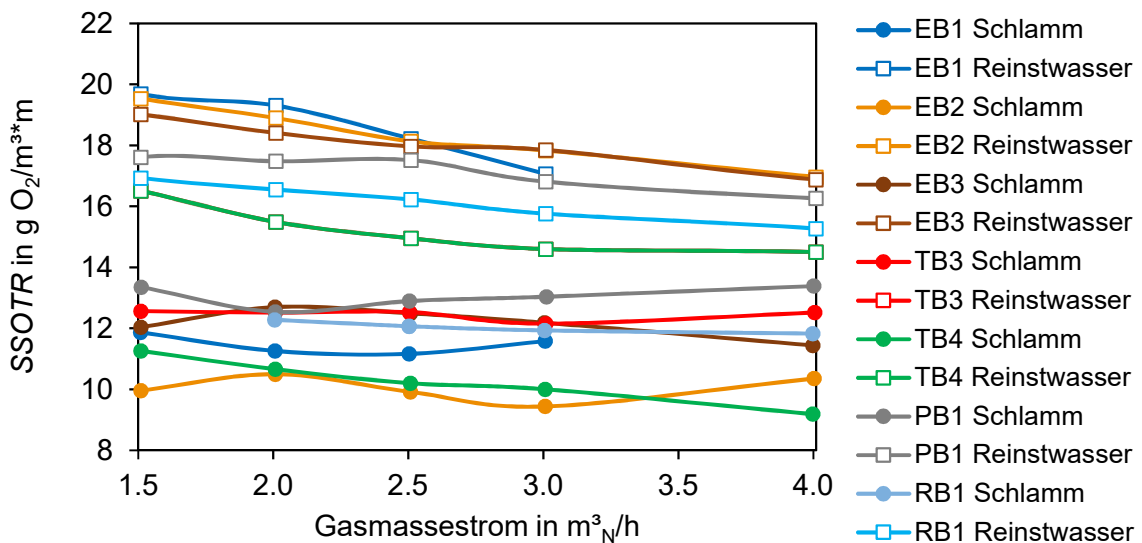


Abbildung 4.33: Vergleich der Standard-Sauerstoffzufuhr in Reinstwasser und Belebtschlamm für ausgewählte Belüfter.

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.

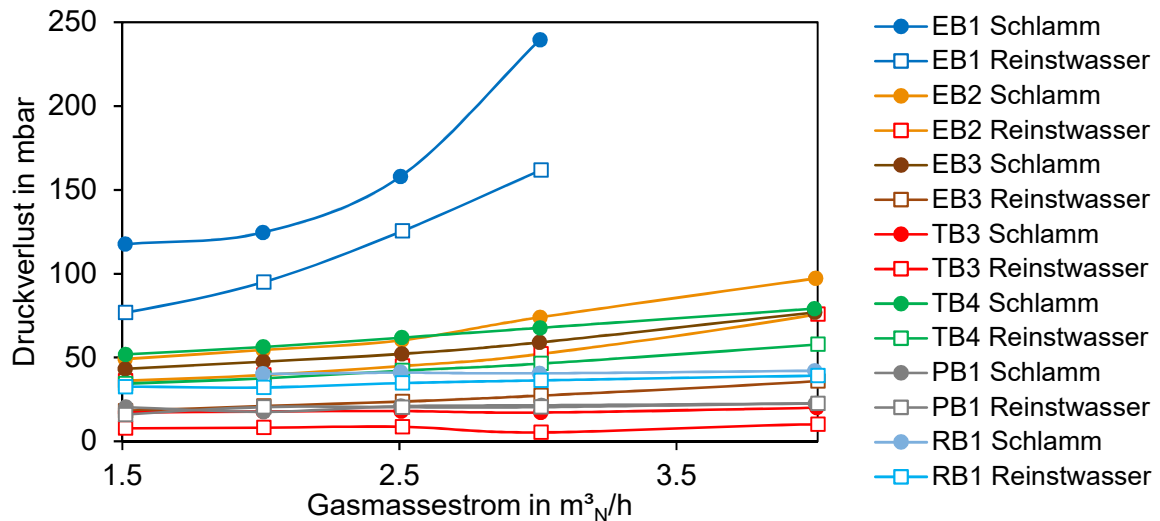


Abbildung 4.34: Vergleich des Druckverlustes von Edelstahl- und Standardbelüftern in Reinstwasser und Belebtschlamm in Abhängigkeit vom Gasmassestrom.

Die Veränderungen von Sauerstoffzufuhr und Druckverlust im Vergleich zu Reinstwasser spiegeln sich auch im Sauerstofftrag wieder. Dieser ist in Abbildung 4.35 für die untersuchten Belüfter gegenüber dem Gasmassestrom aufgetragen. Je nach Belüftermodell und Gasmassestrom ist der Sauerstofftrag 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 Sauerstofftrag 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 cm^2 bei EB3 zeigt diesen negativen Effekt nicht.

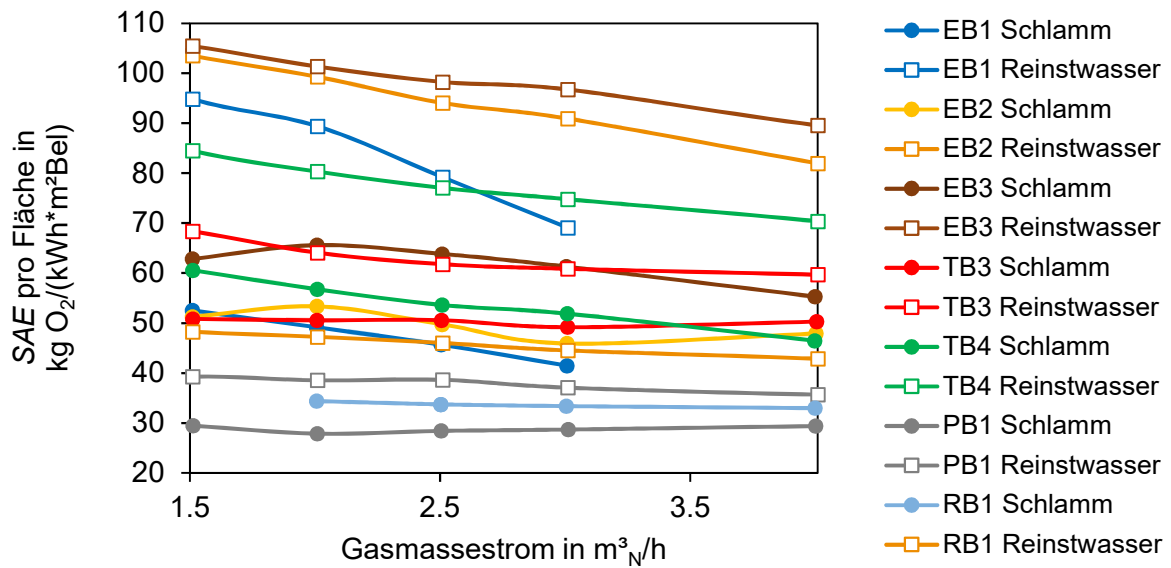


Abbildung 4.35: Vergleich des Sauerstofftrags von Edelstahl- und Membranbelüftern in Reinstwasser und Belebtschlamm in Abhängigkeit vom Gasmassestrom.

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 Sauerstofftrag sowie dem Druckverlust bei Gasmasseströmen mit 2 und 3 $\text{m}^3 \text{N}/\text{h}$. Basierend auf den Ergebnissen aus Abschnitt 4.2, wird die getroffene Auswahl der energetisch effektivsten Belüfter betrachtet.

Da bei der Variation der Einblastiefe eine mögliche Verbesserung höherliegender Belüftungselemente gegenüber tiefliegender untersucht werden sollte, wird für die Gesamtbilanz der Mittelwert aus den Konzentrationsmessdaten der drei Sauerstoffsensoren verwendet. Für die Versuche mit Edelstahlbelüftern wurde der Aufbau nach Variante 1 gewählt. Die Edelstahlbelüfter mit den Lochdurchmessern von 30 μm wurden aufgrund von Beschädigungen nicht für den Fall von unterschiedlichen Einblastiefen untersucht.

4.3.1 Effekt der Einblastiefe in Reinstwasser

Die Ergebnisse der in Abbildung 4.36 und Abbildung 4.37 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. Wie auch schon in den Versuchen aus Kapitel 4.2 erzeugen geringere Volumenströme höhere *SSOTR*-Werte. Das heißt, dass dieser Zusammenhang auch für andere Gasmasseströme zu erwarten ist.

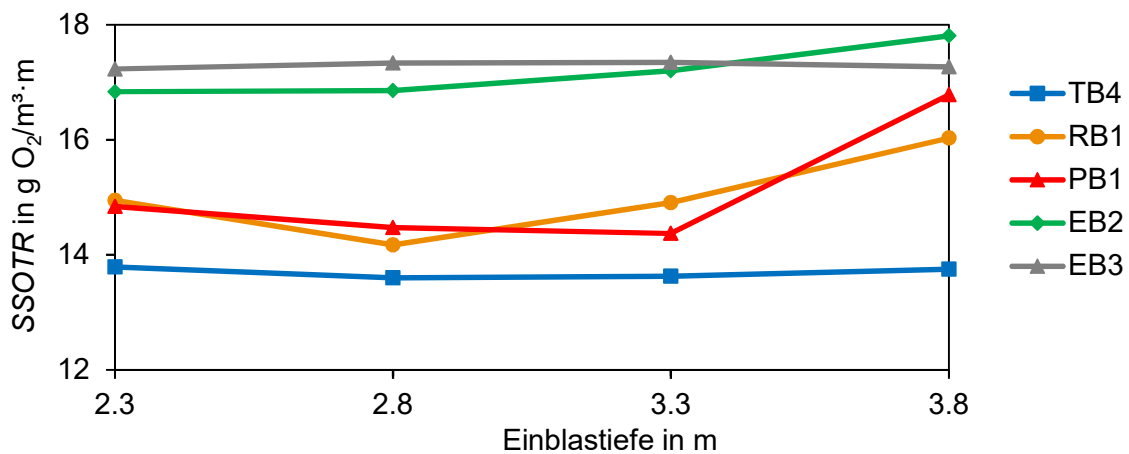


Abbildung 4.36: Verlauf der Spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr in Abhängigkeit der Einblastiefe bei 2 m³N/h.

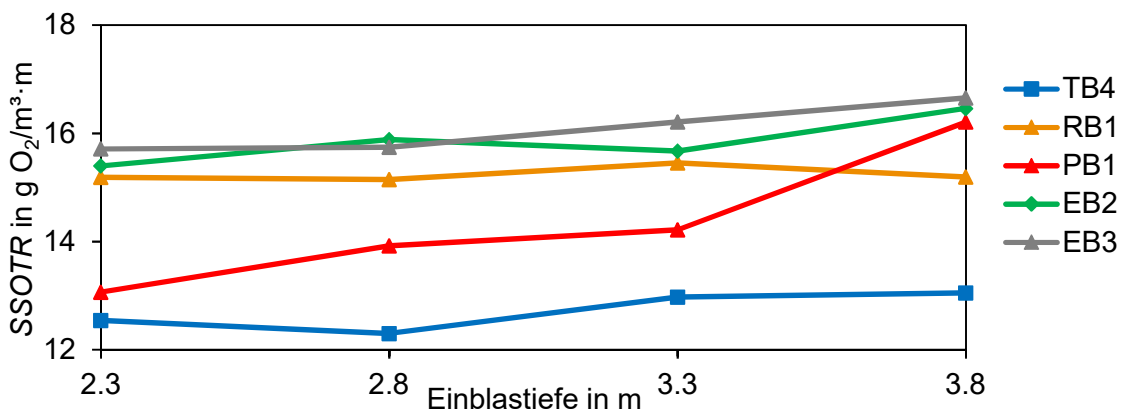


Abbildung 4.37: Verlauf der Spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr in Abhängigkeit der Einblastiefe bei 3 m³N/h.

Da es sich bei der Darstellung um den Mittelwert der *SSOTR*-Werte handelt, sind in Abbildung 4.36 die *SSOTR*-Werte der einzelnen Sensoren „DO bot“, „DO mid“ und „DO top“ dargestellt. Als Belüfter dient hierfür TB4 und die EB3. Die Verläufe der *SSOTR*-Werte zeigen, dass diese für die Sensoren „DO mid“ und „DO top“ relativ kon-

stant über die Einblastiefe sind. Deutlich wird jedoch, dass mit einer geringer werdenden Einblastiefe, die spezifische Standard-Sauerstoffzufuhr für den untersten Sensor „DO bot“ abnimmt. Dies ist damit zu begründen, dass in diesem Bereich immer weniger Luftblasen vorhanden sind und lediglich die Konvektion und Diffusion den Sauerstoff transportieren. Je weiter der Belüfter über dem Sauerstoffsensor liegt, desto stärker wird dieser Effekt ausgeprägt. Bei der Betrachtung des Mittelwertes der drei Sensoren, ist eine Verringerung des *SSTOR*-Wertes zu erkennen. Damit wird die Vermutung bestätigt, dass eine geringere Einblastiefe bei gleichem Beckenvolumen aufgrund der geringeren Verweilzeit der Luftblasen im Wasser, nachteilig ist.

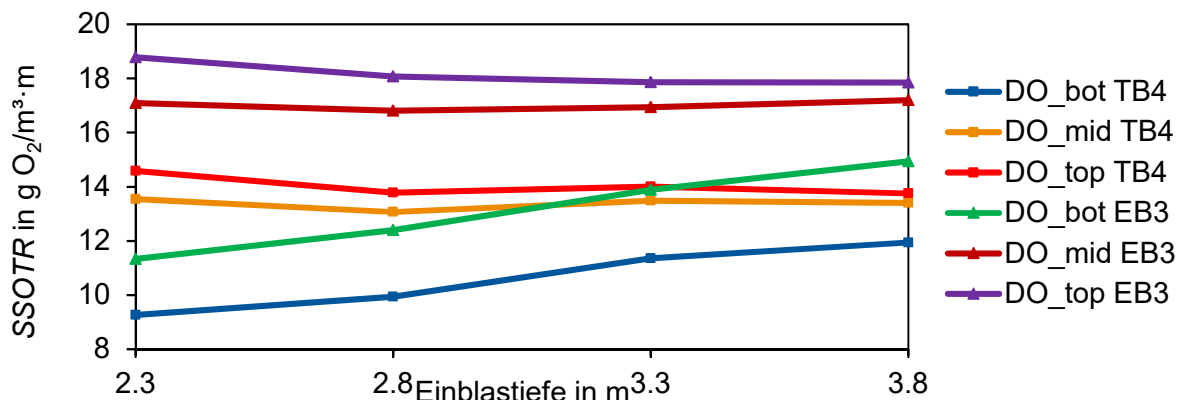


Abbildung 4.38: Verlauf der Spezifischen Standard-Sauerstoffzufuhr in Abhängigkeit der Einblastiefe je Sauerstoffsonde bei 3 m³_N/h.

Ebenfalls nimmt der Sauerstofftrag mit Verringerung der Einblastiefe ab. Dessen Verlauf ist in Abbildung 4.39 und Abbildung 4.40 dargestellt. Den Untersuchungen nach, konnte für die verwendeten Verdichterdaten keine Energieeinsparung durch die Reduzierung der Einblastiefe erzielt werden. Diese Tendenz wird von den Erkenntnissen von Müller (1989), Frey (1996), Pöpel et. al (1998) und Thiersch (2001) gestützt. Dabei steigt der Sauerstofftrag mit zunehmender Einblastiefe, bis er ein lokales Maximum erreicht.

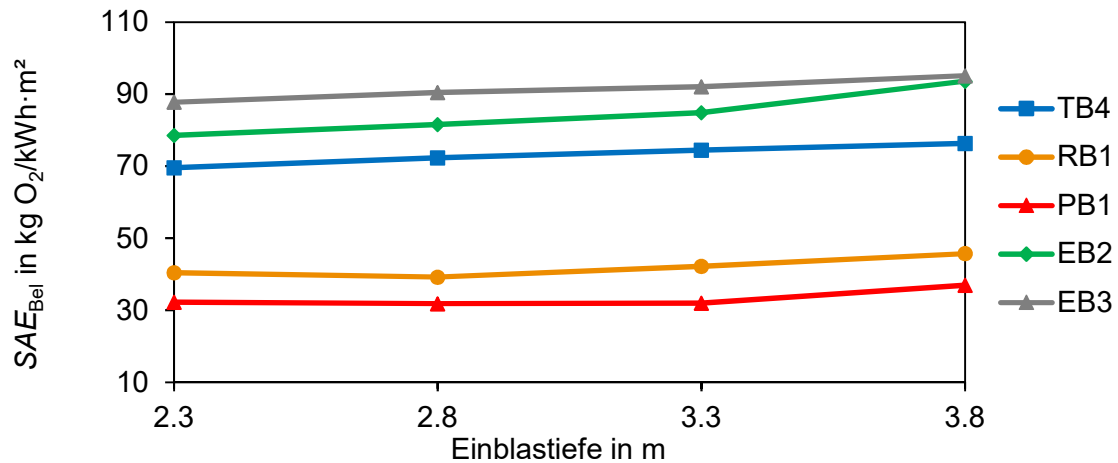


Abbildung 4.39: Verlauf des Sauerstoffertrages in Abhängigkeit der Einblastiefe bei 2 m³N/h.

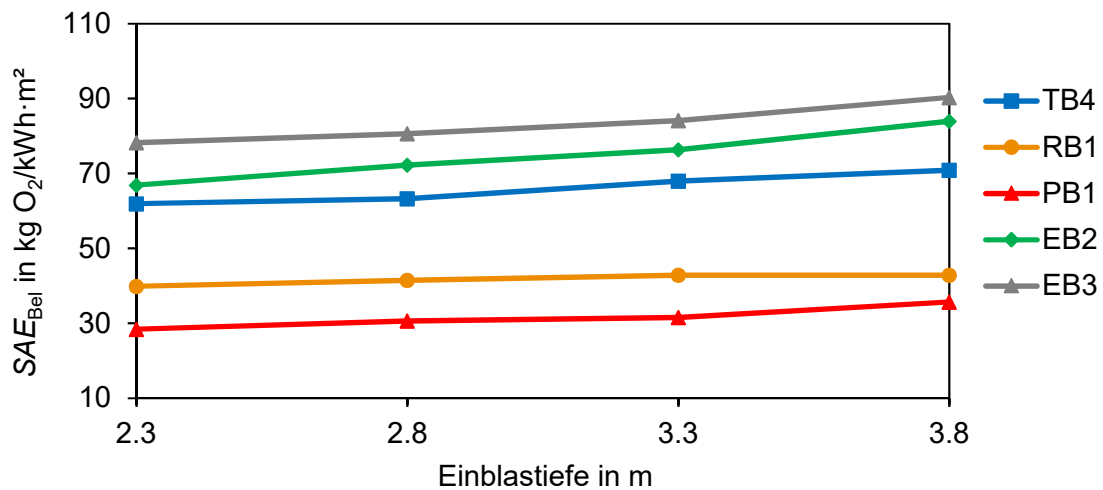


Abbildung 4.40: Verlauf des Sauerstoffertrages in Abhängigkeit der Einblastiefe bei 3 m³N/h.

Die in Abbildung 4.40 dargestellten SAE_{Bel} -Werte zeigen einen ansteigenden Verlauf mit steigender Einblastiefe und bestätigen damit die Erkenntnisse aus der Literatur (DWA-M 229-1, 2013). Weiterhin zeigen die Untersuchungen, dass der Druckverlust der Belüftungselemente unabhängig von der Einblastiefe erwartungsgemäß annähernd konstante Werte annimmt. Die Versuchsergebnisse hierfür sind in Abbildung 4.41 und Abbildung 4.42 dargestellt. Lediglich EB2 weisen größere Messwertschwankungen auf. Ein direkter Einfluss der Wassersäule auf die Membranen oder die Edelstahlplatten, beziehungsweise auf deren Luftaustrittsöffnungen und der Blasenbildung ist nicht ersichtlic.

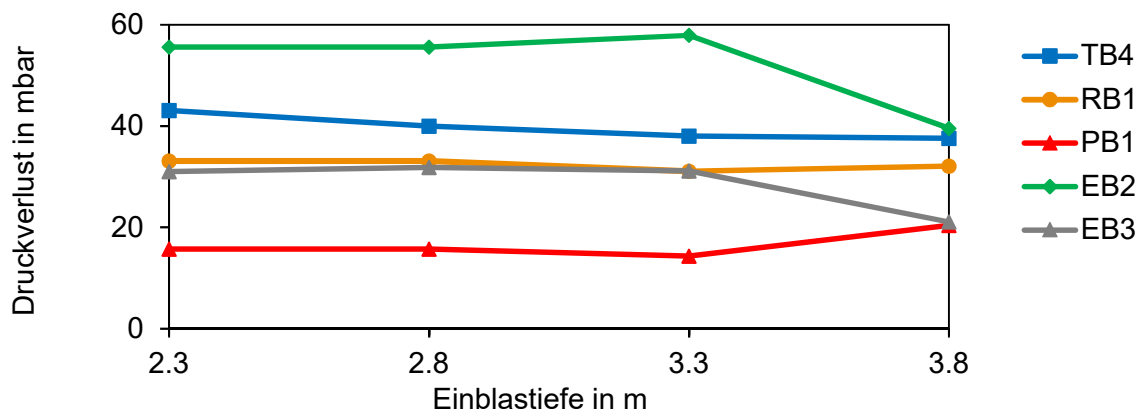


Abbildung 4.41: Verlauf des Druckverlustes in Abhängigkeit der Einblastiefe bei 2 m³N/h.

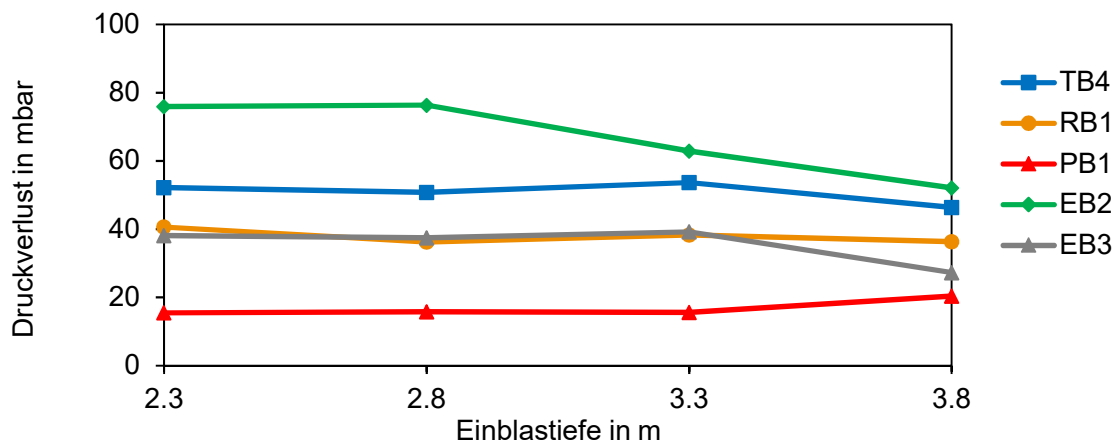


Abbildung 4.42: Verlauf des Druckverlustes in Abhängigkeit von der Einblastiefe bei 3 m³N/h.

4.3.2 Effekt der Einblastiefe in Belebtschlamm

Die Variation der Einblastiefe in Belebtschlamm sollte einerseits die Ergebnisse aus den Reinstwasseruntersuchungen bestätigen, andererseits sollten Erfahrungen für den Betrieb unter realitätsnahen Bedingungen gewonnen werden. Da kein anderes Verhalten in Bezug auf Sauerstoffzufuhr und -ertrag in Bezug auf die Einblastiefe zu erwarten war, beschränkten sich die Untersuchungen auf die Messung aller Parameter auf die Einblastiefe von 2,8 m. Diese Werte wurden mit den Messungen im Reinstwasser verglichen.

In Abbildung 4.43 sind die Standard-Sauerstoffzufuhrwerte für die Belüfter bei 2,8 m Einblastiefe dargestellt. Wie schon aus den Sauerstoffzufuhrmessungen bekannt, lie-

gen auch hier die Werte für die Belebtschlammmessungen niedriger als die im Reinstwasser. Weiterhin ist ein Abfall der Sauerstoffzufuhr mit Zunahme des Gasmassestroms zu erkennen. Dieser fällt je nach Belüfter unterschiedlich stark aus. Ausnahmen sind hier RB1 und PB1, die bis zu 3,0 m³N/h ihre Sauerstoffzufuhr steigern können. Da dies die Belüfter mit der größten Abgasfläche sind, sind diese bei geringen Gasmasseströmen nicht über die gesamte Abgasfläche gleichmäßig belüftet, wodurch Sedimentation auf dem Belüfter auftreten kann und so die Blasenbildung behindern kann. Bei den Edelstahlbelüftern sinkt der SSOTR im Belebtschlamm im Mittel um 27 %, bei TB4 und PB1 um knapp 20 % und bei RB1 um nur etwa 10 %. Die Verringerung der Sauerstoffzufuhr ist damit vergleichbar mit dem Fall für 3,8 m Einblastiefe (vgl. Abbildung 4.33).

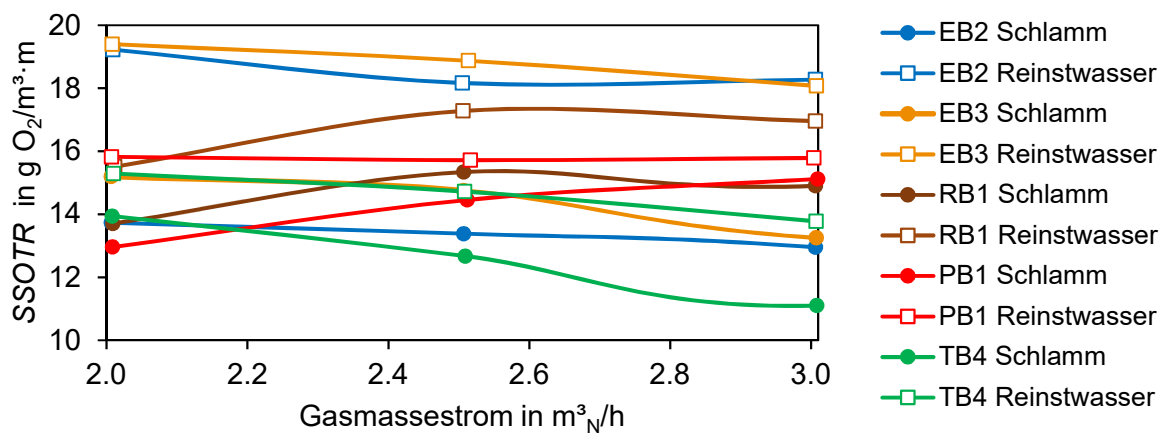


Abbildung 4.43 Spezifische Standardsauerstoffzufuhr bei 2,8 m Einblastiefe im Vergleich zwischen Belüftern in Reinstwasser und Belebtschlamm.

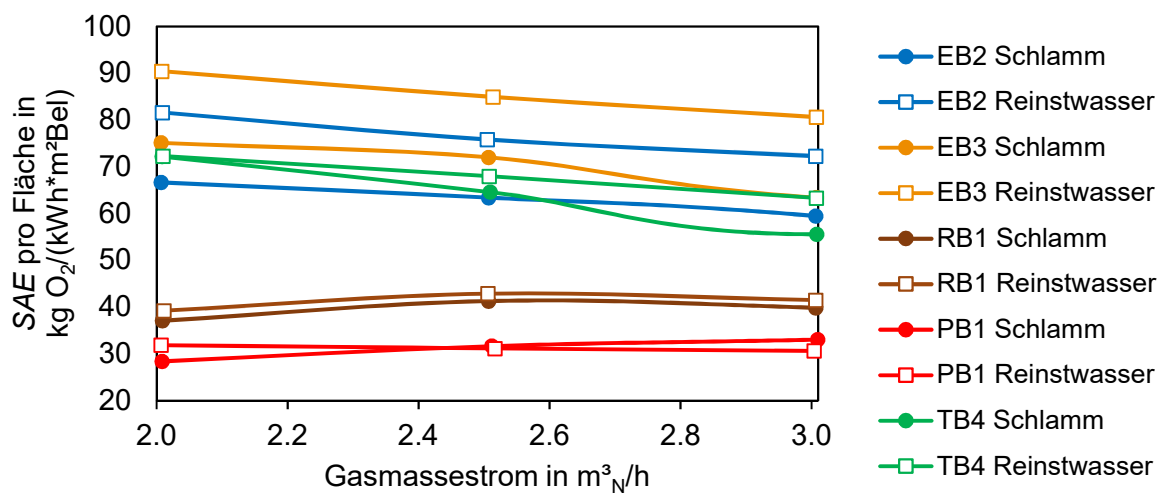


Abbildung 4.44: Standardsauerstofftrag bei 2,8 m Einblastiefe im Vergleich zwischen Belüftern in Reinstwasser und Belebtschlamm.

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 Gasmasseströmen der Belüfter wurde der Bereich unterhalb der Belüfter nicht mehr ausreichend durchmischt, um die Belebtschlammflocken in der Schwebelage 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.



Abbildung 4.45: Schlammsedimentation während der Belüftung mit 2,8 m Einblastiefe. Aufgenommen durch das unterste Schauglas der Technikumsanlage.

Aufgrund der Versuchsergebnisse aus Reinstwasser- und Belebtschlammuntersuchungen mit verringerten Einblastiefen kann keine Empfehlung für die Verringerung der Einblastiefe zur Energieeinsparung gegeben werden. So sinkt der Sauerstofftrag für die gesamte Technikumsanlage aufgrund der schlechteren Sauerstoffzufuhr in den Bereich unterhalb der Belüfter und bei Verwendung von Belebtschlamm ist die Anfälligkeit für Sedimentation in diesem Bereich sehr groß. Eine etwaige Einsparung an Energie durch den verringerten hydrostatischen Druck müsste durch Rührer wieder aufgebracht werden, um die Sedimentation zu verhindern.

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 4.46 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.

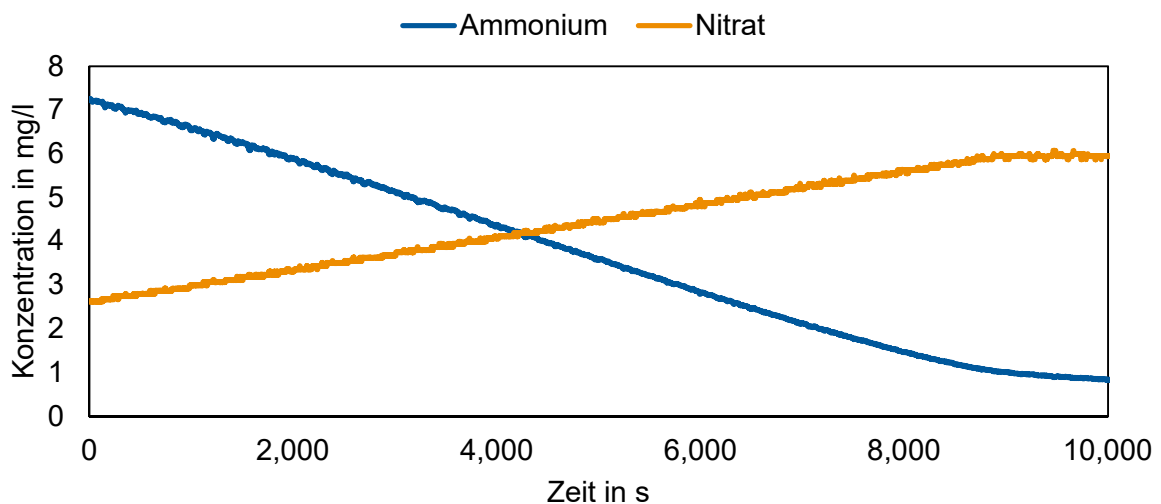


Abbildung 4.46: Konzentrationsverlauf von Ammonium und Nitrat bei einem Abbauprobierlauf in der Technikumsanlage.

Da die Ammoniumkonzentration und gerade zum Ende des Abbauprobierlaufs auch die Abbaurate sank, variierte entsprechend der Regelung der Gasmassstrom während der Versuchszeit. Aus den gemessenen Druckverlusten der gesamten Versuchszeit wurden Mittelwerte gebildet. Diese sind in Abbildung 4.47 dargestellt. Zwei Standardmembranbelüfter fielen dabei mit sehr niedrigen Druckverlusten auf. Dies war TB 3 und PB1. Der EB3 findet sich im mittleren Bereich wieder und ist bei dem Druckverlust auf gleicher Höhe wie kommerzielle Tellerbelüfter. Nur EB1 weisen einen deutlich höheren Druckverlust auf.

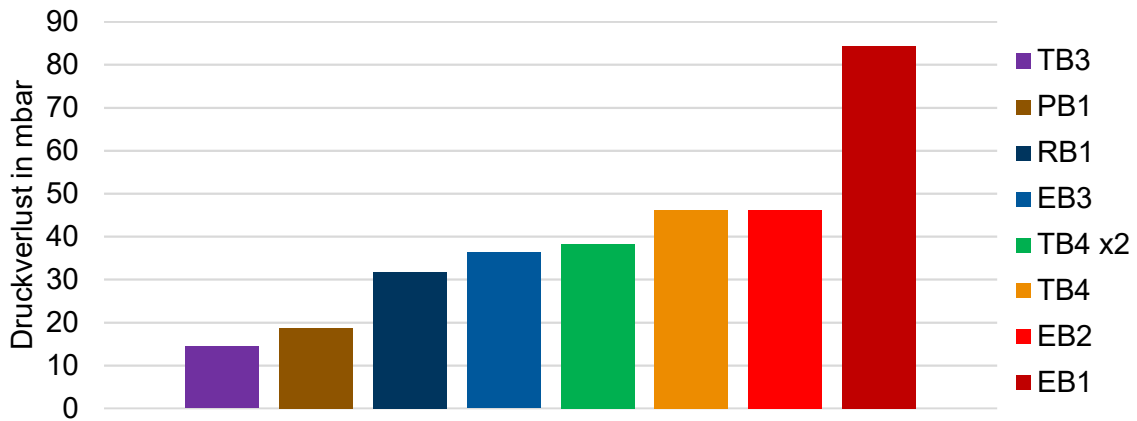


Abbildung 4.47: Mittlerer Druckverlust während des Ammoniumabbaus in der Technikanlage für acht Belüfterkonfigurationen.

Zum Vergleich der eigentlichen Reinigungsleistung der Belüfter wird die abgebaute Ammoniummasse in das Verhältnis zur benötigten Luftmasse für den Ammoniumabbau gesetzt. So ist ein Vergleich der Belüfter möglich auch wenn die Versuche mit unterschiedlichen Belebtschlammzusammensetzungen durchgeführt wurden. Der Vergleich der Belüfter ist in Abbildung 4.48 aufgeführt.

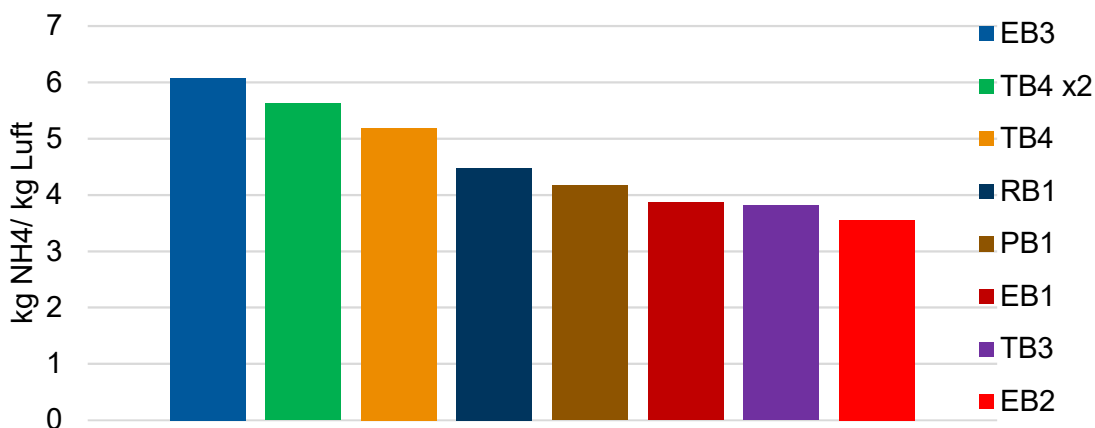


Abbildung 4.48: Verhältnis von abgebaute Ammoniummasse zu eingesetzter Luftmasse für vollständigen Ammoniumabbau.

Hier erreichen die Edelstahlbelüfter mit 70 µm Lochdurchmesser das beste Verhältnis. Sie liegen teils deutlich vor den kommerziellen Membranbelüftern. Jedoch schneiden die Edelstahlbelüfter mit kleineren Lochgrößen schlechter ab. Die Belüfter mit 50 µm Löchern erzielen sogar das kleinste Ammonium-Luftmasse-Verhältnis. Ein möglicher Grund hierfür ist die geringe Sauerstoffzufuhr in Belebtschlamm, die vorher schon experimentell nachgewiesen wurde (vgl. Abschnitt 4.2.3).

Die Reinigungsleistung gemäß Gleichung (3.7) bezogen auf die Belüfterfläche ist im

Diagramm der Abbildung 4.49 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 Luftmassenstrom 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.

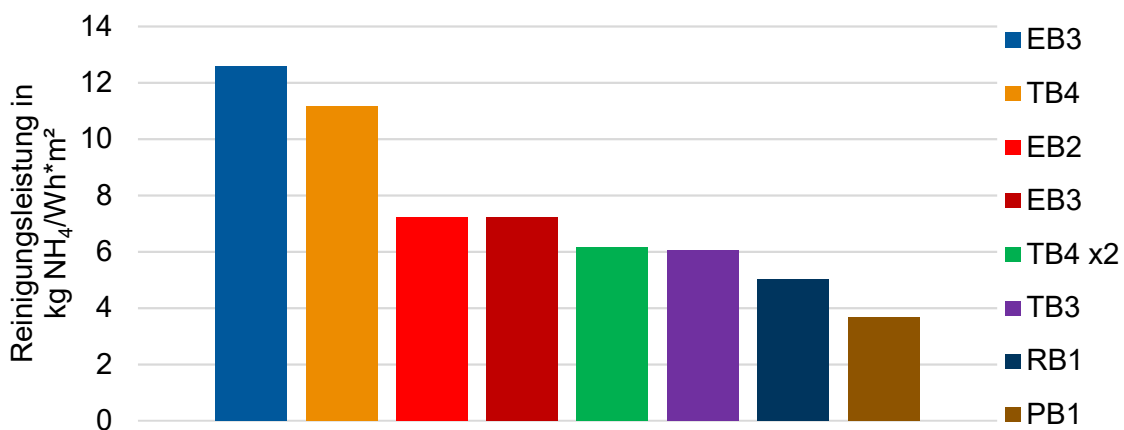


Abbildung 4.49: Vergleich der Reinigungsleistung bezogen auf die Belüfterfläche in Belebtschlamm für verschiedene Belüfter.

Bei Betrachtung von unterschiedlichen Regelungszielen für den Gelöstsauerstoff mit den vier Belüftern die in Abbildung 4.50 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.

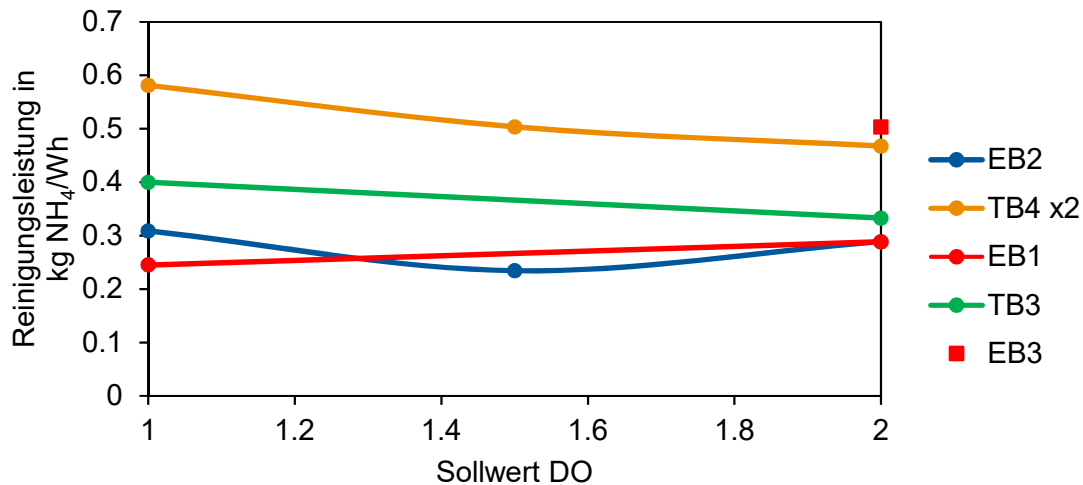


Abbildung 4.50: Vergleich der Reinigungsleistung bei Regelzielen zwischen 1 und 2 mg/l Sauerstoffgehalt in Belebtschlamm für eine Belüfterauswahl.

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 feinsten Initialblasen. Dies deckt sich mit Beobachtungen von Behnisch (2018).

5 Energetische und wirtschaftliche Bilanzierung

Mit den experimentell ermittelten Werten für Reinigungsleistung und Sauerstofftrag der Edelstahlbelüfter und der kommerziellen Membranbelüfter 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 Plattenbelüfers wurden die energetischen Vorteile des Edelstahlbelüfers mit 70 µm Lochgröße, des TB4 und des RB1 in Bezug auf Reinigungsleistung und Sauerstofftrag eingerechnet. So ist beispielsweise der Sauerstofftrag 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 m² für die Beispielskläranlage. In Tabelle 5.1 sind die daraus resultierenden Belüfteranzahlen, die jeweiligen Werte für Sauerstofftrag 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 [m ²]	0,1	0,04	0,038	0,075
Resultierende Belüfteranzahl	2336	5840	6147	3115
SAE_{Bel} [kg O ₂ /(kWh*m ² Bel)]	28,76	61,77 (+ 115 %)	53,86 (+ 87 %)	33,63 (+17 %)
Reinigungsleistung [kg NH ₄ /Wh*m ²]	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
Rücklaufschlammumpen	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
CO ₂ -Emission [t/a]	416,0	233,3	257,1	366,4
Einsparung CO ₂ -Emission [t/a]		183	159	50
Einsparung CO ₂ -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
Rücklaufschlammumpen	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 Anhang. Die Investitionskosten für die Edelstahlbelüfter mit einer aktiven Belüfterfläche von $0,04 \text{ m}^2$ 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 Betrachtung

der Sauerstoffertragsverbesserung ist eine Amortisation nach 2,6 und bei Reinigungsleistungverbesserung 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. Reinigungsleistungverbesserung.

		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 Sauerstoffeintragungseffizienz 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 daraus entwickelten Edelstahlbelüftern und kommerziell erhältlichen Membranbelüftern zur Sauerstoffzufuhr in Reinstwasser, salzhaltigem Wasser und Belebtschlamm durchgeführt. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt.

Bei den videometrischen Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass mit den Kanülen bzw. starren Lochöffnungen die Bildung von substantiell feineren Blasen im Vergleich zu den Membranbelüftern möglich ist. Es wurde gezeigt, dass mit diesem Belüfterkonzept Blasen mit einem mittleren Sauterdurchmesser von ca. 1,5 mm erzeugt werden können. Mit kleineren Öffnungsdurchmessern sind geringere Blasengrößen erreichbar. Jedoch zeigte sich, dass dabei gleichzeitig der Druckverlust stark ansteigt. Der Druckverlust der Lochplatten ist dabei bei gleichem Öffnungsdurchmesser geringer als bei den Kanülen, da bei den Kanülen die Luft zusätzlich durch die gesamte Kanülenlänge gedrückt werden muss. Dabei wurde auch aufgezeigt, dass die Lochbleche mit nur 300 µm Stärke feinere Blasen erzeugen als Bleche mit 500 µm. Weiterhin hat eine Oberflächenbearbeitung zur Senkung des Phasenkontaktwinkels eine positive Auswirkung auf die Blasengröße. Bezogen auf die Blasengröße und Druckverlust zeigen die Lochplatten mit 50 µm Öffnungsdurchmesser die besten Ergebnisse. Der gewählte Lochabstand von 5 mm führt zu kleineren Blasen als der größere Abstand von 12,5 mm. Ein kleinerer Lochabstand als 5 mm erscheint hingegen bezüglich höherer Blasenkoaleszenz neigung nicht sinnvoll.

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 erzielen die Edelstahlbelüfter in Reinstwasser im Bereich von 1 bis 7 m³_N/h höhere SSOTR-Werte. Trotzdem der Druckverlust je nach Konfiguration teilweise größer als bei den Membranbelüftern ist, erreichen die Edelstahlbelüfter im Vergleich über einen weiten Bereich der untersuchten Gasmasseströme die besten Werte

beim Sauerstofftrag 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 Sauerstofftrag untersucht. Wobei der höhere Sauerstofftrag der Edelstahlbelüfter bestätigt werden konnte. Mindestens 20 % höhere SAE_{Bel} -Werte als bei konventionellen Membranbelüftern werden 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 Sauerstofftrag über dem besten Membranbelüfter im Vergleich 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.

Mit dem Hintergrund der möglichen Energieeinsparung durch verringerten hydrostatischen Druck bei geringerer Einblastiefe wurden die Belüfter auf unterschiedlichen Höhen in der Technikumsanlage eingebracht und die Sauerstoffzufuhr bestimmt. Die mittlere Sauerstoffzufuhr aus den Sauerstoffsensoren in drei Höhen verringert sich geringfügig. Jedoch nimmt die Sauerstoffzufuhr unterhalb der Belüfter deutlicher ab, da dieser Bereich nicht mehr aktiv belüftet wird. Der hydrostatische Druck ist erwartungsgemäß niedriger. Der Druckverlust der Belüfter bleibt unverändert. Dies führt dazu, dass trotz geringeren Drücken der Sauerstofftrag nicht gesteigert werden kann. Weiterhin wurden Versuche zum Effekt der Einblastiefe auch in Belebtschlamm durchgeführt. Dort wurde das Ergebnis der Reinstwasserversuche bestätigt und außerdem festgestellt, dass es zu starker Sedimentation von Belebtschlammteilchen unter den Belüftern kommt. Daher wird die Verringerung der Einblastiefe, wie sie im Forschungsprojekt untersucht wurde, nicht empfohlen. Sobald unter den Belüftern ein größeres nicht direkt belüftetes Volumen vorhanden ist, steigt das Risiko der Sedimentation und zusätzliche Belüfter werden erforderlich. Somit ist mit keiner Energieeinsparung durch

die geringere Einblastiefe zu rechnen.

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 dem besten Membranbelüfter im Vergleich. 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, wovon 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

- tieften 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.

8 Anhang

Zu Kapitel 5:

Tabelle 8.1: Energie- und CO₂-Einsparung nach SAE_{Bel}-Verbesserung

Energieverbrauch im Teilbereich	PB1 [kWh/a]	EB3 [kWh/a]	TB4 [kWh/a]	RB1 [kWh/a]
Belüftung	638689	297065	341545	545888
Rührwerke	70080	70080	70080	70080
Rezirkulationspumpen	20228	20228	20228	20228
Rücklaufschlammumpen	48632	48632	48632	48632
Summe	777629	436005	480485	684828
eBel [kWh/(e a)]	17,4	9,8	10,8	15,3
Einsparung Referenzkläranlage				
Energieeinsparung [kWh/a]		341624	297144	92801
Energieeinsparung [%]		43,9	38,2	11,9
CO ₂ -emission [t/a]	416,0	233,3	257,1	366,4
Einsparung CO ₂ -Emission [t/a]		183	159	50
Einsparung CO ₂ -Emission [%]		43,9	38,2	11,9

Tabelle 8.2: Amortisationsrechnung nach SAE_{Bel}-Verbesserung

Investition Belüftung		PB1	EB3	TB4	RB1
1	Investition Belüfter €/Stk,	35	35	25	25
2	aktive Belüfterfläche m ² /Stk,	0,1	0,04	0,038	0,075
3	spez, Investition netto €/m ²	350	875	658	333
4	Stückzahl pro KA-Schwerte Stk,	2336	5840	6147	3115
5	aktive Membranfläche je KA m ²	234	234	234	234
6	spez, Investition Verteilerleitungen plus Anlieferung und Montage €/m ²	50	25	50	50
7	Investition Kompressor €				
8	Investition netto €	93.440	210.240	165.364	89.547
9	Betriebsdauer a	5,0	5,0	5,0	5,0
10	Zinsen p,a, %	5,0	5,0	5,0	5,0
11	Ø Zins p,a, %	2,50	2,50	2,50	2,50
12	Ø Zins €/a	2.336,0	5.256,0	4.134,1	2.238,7
13	AfA €/a	18.688,0	42.048,0	33.072,8	17.909,3
14	Ø Kapitalkosten €/a	21.024,0	47.304,0	37.206,9	20.148,0
15	Kosten KA-Schwerte €	105.120	236.520	186.035	100.740
16	Mehrinvestition €		131.400	80.915	-4380,00
17	Einsparung EB der Luftzufuhr im Bereich 1...2 mg/l ggü, PB %		115	87	17

18	Energieverbrauch Belüftung - Referenzbetrieb 2005	kWh/a	638.689	297.064,65	341.544,92	545.888,03
19	Energieeinsparung	kWh/a		341.624	297.144	92.801
20	Energiepreis 1 Industrie	€/kWh	0,150	0,150	0,150	0,150
21	Energiepreis 2 Verbraucher	€/kWh	0,275	0,275	0,275	0,275
22	Kosteneinsparung 1	€/a		51.244	44.572	13.920
23	Kosteneinsparung 2	€/a		93.947	81.715	25.520
22	Kosteneinsparung 1	€		256.218	222.858	69.601
23	Kosteneinsparung 2	€		469.733	408.573	127.601
24	Amortisationszeit 1	a		2,6	1,8	-0,31
25	Amortisationszeit 2	a		1,4	1,0	-0,17
<hr/>						
26	Saldo KE ./, MK ¹⁾ 1	€/a		24.964	28.389	14.796
27	Saldo KE ²⁾ ./, MK 2	€/a		67.667	65.532	26.396
28	Saldo KE ./, MK 1	€		124.818	141.943	73.981
29	Saldo KE ./, MK 2	€		338.333	327.658	131.981

¹⁾ MK - Mehrkosten ²⁾ KE - Kostenenergieeinsparung

Tabelle 8.3: Energie- und CO2-Einsparung nach Reinigungsleistungsverbesserung

ENERGIEVERBRAUCH IM TEILBEREICH	PB1 [kWh/a]	EB3 [kWh/a]	TB4 [kWh/a]	RB1 [kWh/a]
Belüftung	638689	187850	209406	469624
Rührwerke	70080	70080	70080	70080
Rezirkulationspumpen	20228	20228	20228	20228
Rücklaufschlammumpen	48632	48632	48632	48632
Summe	777629	326790	348346	608564
eBel [kWh/(e a)]	17,4	7,3	7,8	13,6
Einsparung Referenzkläranlage				
Energieeinsparung [kWh/a]		450839	429283	169065
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

Tabelle 8.4: Amortisationsrechnung nach Reinigungsleistungsverbesserung

Investition Belüftung		PB1	EB3	TB4	RB1
1	Investition Belüfter €/Stk,	35	35	25	25
2	aktive Belüfterfläche m ² /Stk,	0,1	0,04	0,038	0,075
3	spez, Investition netto €/m ²	350	875	658	333
4	Stückzahl pro KA-Schwerte Stk,	2336	5840	6147	3115

5	aktive Membranfläche je KA	m ²	234	234	234	234
6	spez. Investition Verteilerleitungen plus Anlieferung und Montage	€/m ²	50	25	50	50
7	Investition Kompressor	€				
8	Investition netto	€	93.440	210.240	165.364	89.547
9	Betriebsdauer	a	5,0	5,0	5,0	5,0
10	Zinsen p,a,	%	5,0	5,0	5,0	5,0
11	Ø Zins p,a,	%	2,50	2,50	2,50	2,50
12	Ø Zins	€/a	2.336,0	5.256,0	4.134,1	2.238,7
13	AfA	€/a	18.688,0	42.048,0	33.072,8	17.909,3
14	Ø Kapitalkosten	€/a	21.024,0	47.304,0	37.206,9	20.148,0
15	Kosten KA-Schwerte	€	105.120	236.520	186.035	100.740
16	Mehrinvestition	€		131.400	80.915	-4.380
17	Einsparung EB der Luftzufuhr im Bereich 1...2 mg/l ggü. PB	%		240	205	36
18	Energieverbrauch Belüftung - Referenzbetrieb 2005	kWh/a	638.689	187.849,71	209.406,23	469.624,26
19	Energieeinsparung	kWh/a		450.839	429.283	169.065
20	Energiepreis 1 Industrie	€/kWh	0,150	0,150	0,150	0,150
21	Energiepreis 2 Verbraucher	€/kWh	0,275	0,275	0,275	0,275
22	Kosteneinsparung 1	€/a		67.626	64.392	25.360
23	Kosteneinsparung 2	€/a		123.981	118.053	46.493
22	Kosteneinsparung 1	€		338.129	321.962	126.799
23	Kosteneinsparung 2	€		619.904	590.264	232.464
24	Amortisationszeit 1	a		1,9	1,3	-0,17
25	Amortisationszeit 2	a		1,1	0,7	-0,09
26	Saldo KE ./, MK ¹⁾ 1	€/a		41.346	48.209	26.236
27	Saldo KE ²⁾ ./, MK 2	€/a		97.701	101.870	47.369
28	Saldo KE ./, MK 1	€		206.729	241.047	131.179
29	Saldo KE ./, MK 2	€		488.504	509.349	236.844

1) MK - Mehrkosten 2) KE - Kostenenergieeinsparung

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>