

# REPORT

Cicerostr. 24  
D-10709 Berlin  
Germany  
Tel +49 (0)30 536 53 800  
Fax +49 (0)30 536 53 888  
www.kompetenz-wasser.de

## Abschlussbericht Projekt Abluft „Vorversuche zur Abluftbehandlung auf der Kläranlage Schönerlinde“

von

Rabea-Luisa Schubert und Dr. Ulf Miehe

Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH

Die Mittel zur Ausarbeitung dieses Berichtes wurden von den Berliner Wasserbetrieben zur Verfügung gestellt.



Berlin, Germany

2014

© Copyright 2014 by the Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH. All rights including translation into other languages, reserved under the Universal Copyright Convention, the Berne Convention or the Protection of Literacy and Artistic Works, and the International and Pan American Copyright Conventions.

Present report was developed in compliance with the requirements of the quality management system DIN EN ISO 9001:2008

### **Important Legal Notice**

**Disclaimer:** The information in this publication was considered technically sound by the consensus of persons engaged in the development and approval of the document at the time it was developed. KWB disclaims liability to the full extent for any personal injury, property, or other damages of any nature whatsoever, whether special, indirect, consequential, or compensatory, directly or indirectly resulting from the publication, use of application, or reliance on this document. KWB disclaims and makes no guaranty or warranty, expressed or implied, as to the accuracy or completeness of any information published herein. It is expressly pointed out that the information and results given in this publication may be out of date due to subsequent modifications. In addition, KWB disclaims and makes no warranty that the information in this document will fulfill any of your particular purposes or needs. The disclaimer on hand neither seeks to restrict nor to exclude KWB's liability against all relevant national statutory provisions.

### **Wichtiger rechtlicher Hinweis**

**Haftungsausschluss:** Die in dieser Publikation bereitgestellte Information wurde zum Zeitpunkt der Erstellung im Konsens mit den bei Entwicklung und Anfertigung des Dokumentes beteiligten Personen als technisch einwandfrei befunden. KWB schließt vollumfänglich die Haftung für jegliche Personen-, Sach- oder sonstige Schäden aus, ungeachtet ob diese speziell, indirekt, nachfolgend oder kompensatorisch, mittelbar oder unmittelbar sind oder direkt oder indirekt von dieser Publikation, einer Anwendung oder dem Vertrauen in dieses Dokument herrühren. KWB übernimmt keine Garantie und macht keine Zusicherungen ausdrücklicher oder stillschweigender Art bezüglich der Richtigkeit oder Vollständigkeit jeglicher Information hierin. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die in der Publikation gegebenen Informationen und Ergebnisse aufgrund nachfolgender Änderungen nicht mehr aktuell sein können. Weiterhin lehnt KWB die Haftung ab und übernimmt keine Garantie, dass die in diesem Dokument enthaltenen Informationen der Erfüllung Ihrer besonderen Zwecke oder Ansprüche dienlich sind. Mit der vorliegenden Haftungsausschlussklausel wird weder bezweckt, die Haftung der KWB entgegen den einschlägigen nationalen Rechtsvorschriften einzuschränken noch sie in Fällen auszuschließen, in denen ein Ausschluss nach diesen Rechtsvorschriften nicht möglich ist.

## Impressum

Dieser Bericht wurde nach den Vorgaben des Qualitätsmanagements gemäß DIN EN ISO 9001:2008 erarbeitet.

### Titel

Vorversuche zur Abluftbehandlung auf der Kläranlage Schönerlinde

### Autoren

Rabea-Luisa Schubert, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH

Dr. Ulf Miehe, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH

### Qualitätssicherung

Jan Waschnewski, Berliner Wasserbetriebe

Dr. Pascale Rouault, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH

Finale Version

Datum: 20.06.2014

# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	8
2. Versuchsanordnung auf der Kläranlage.....	9
2.1 Messstellen und –technik .....	10
2.2 Messprinzip der Handmessungen in der Gasphase.....	14
3. Charakterisierung des Rohabwassers (Zulauf zur KA).....	16
4. Versuche der Mitbehandlung .....	19
4.1 Aufbau der Mitbehandlung.....	19
4.2 Versuchsprogramm .....	22
4.3 Versuchsdurchführung an der Mitbehandlung, Ergebnisdarstellung und Diskussion .....	22
4.4 Materialprüfung.....	41
4.5 Betriebliches.....	42
4.6 Betriebskosten der Mitbehandlung.....	44
5. Versuche an der UV-Anlage .....	47
5.1 Versuchsaufbau.....	47
5.2 Versuchsverlauf.....	48
5.3 Versuchsprogramm .....	49
5.4 Versuchsdurchführung an der UV-Anlage, Ergebnisdarstellung und Diskussion..	49
5.5 Betriebskosten der UV-Anlage.....	55
6. Fehlerbetrachtung.....	57
6.1 Messungen im Gas.....	57
6.1.1 Volumenstrom Rohgas.....	57
6.1.2 Rohgaskonzentration in der Zuleitung zur Mitbehandlung in der Belebung ...	58
6.1.3 Prüfröhrchen .....	58
6.1.4 GA 5000 (Gasanalyser) .....	58
6.2 Reingasmessung Mitbehandlung.....	60
6.2.1 Online-Messung im Reingas mit den Odalogs.....	60
6.3 Messtechnik der UV-Anlage .....	61
6.3.1 Online-Messtechnik.....	61
6.3.2 Ozonmessung.....	63
7. Fazit.....	64
7.1 Empfehlungen für großtechnische Erprobung.....	65
8. Literaturverzeichnis.....	67
9. Anhang .....	68

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Anordnung der Versuchsanlagen auf dem Gelände der Kläranlage.....	9
Abbildung 2: Überblick zeitlicher Ablauf der Versuche.....	9
Abbildung 3: Probenahmestellen und gemessene Parameter an beiden Versuchsanlagen .....	10
Abbildung 4: Messung mittels Flügelradmesser im Rohgas zur Mitbehandlung.....	14
Abbildung 5: Messprinzip der Prüfröhrchen, Darstellung über den Rohrquerschnitt .....	15
Abbildung 6: Messaufbau mit dem GA 5000 .....	15
Abbildung 7: Verlauf der Schwefelwasserstoffkonzentration (24-Stunden-Mittelwerte) unter der Abdeckung des Sandfangs und Zulufttemperatur über den Versuchszeitraum. ....	16
Abbildung 8: Überblick über das Becken 3.2 und seine Einteilung in Zonen.....	20
Abbildung 9: links: Anordnung der Rohgas-Belüfterstränge; rechts: Belüfterharken .....	20
Abbildung 10: Schematischer Aufbau der Mitbehandlung.....	21
Abbildung 11: schwimmende Haube auf dem Becken 3.2 zum Auffangen des Reingases .....	21
Abbildung 12: Kumulierte Häufigkeiten und Mittelwerte .....	23
Abbildung 13: Darstellung aller mittels Prüfröhrchen gemessener Roh- und Reingaskonzentrationen.....	24
Abbildung 14: Betriebsstunden der einzelnen Belüfterstränge und Druckverlust pro Belüfter bei einer Beaufschlagung von 1 m/h und 7 m <sup>3</sup> /h .....	26
Abbildung 15: Mittels Online-Messung aufgezeichnete H <sub>2</sub> S-Konzentration über Zone 0 27	
Abbildung 16: Mittels Online-Messung aufgezeichnete H <sub>2</sub> S-Konzentration über der Zone 3, bzw. Zone 2.....	28
Abbildung 17: Schlammvolumenindex der Belebungsbecken eins bis sechs über die letzten sechs Monate .....	33
Abbildung 18: Lage der verschiedenen Sondentypen.....	34
Abbildung 19: theoretischer Verlauf der Sauerstoffkonzentration bei 100% Substitution, .....	35
Abbildung 20: Versuch phasenweise Substitution in Zone 3.....	35
Abbildung 21: Wiederholungsversuch phasenweise Substitution in Zone 3.....	36
Abbildung 22: phasenweise Substitution mit großflächigerer Verteilung der Abluft.....	36
Abbildung 23: Wiederholungsversuch phasenweise Substitution mit großflächigerer Verteilung der Abluft.....	37
Abbildung 24: Verlauf der Sauerstoffkonzentration bei direkter Substitution .....	38

Abbildung 25: Versuchsverlauf nach dem Ansatz der direkten Substitution in Zone 0...	39
Abbildung 26: Dauersubstitutionsversuch in Zone 0.....	40
Abbildung 27: Optische und elektrochemische Messung des Sauerstoffgehaltes .....	41
Abbildung 28: links: neue Silikonmembran; Mitte: Silikonmembran nach Ausbau; rechts: TPU-Membran nach Ausbau.....	42
Abbildung 29: Belüfter mit ausgedehnter Schlauchleitung.....	43
Abbildung 30: Defekte an den schwimmenden Hauben .....	44
Abbildung 31: Luftvolumenströme in das Belebungsbecken.....	45
Abbildung 32: Betriebskosten der Mitbehandlung in Abhängigkeit vom Substitutionsgrad .....	46
Abbildung 33: Schematischer Aufbau der UV-Anlage inklusive der Probenahmestellen und gemessenen Parameter .....	47
Abbildung 34: Aufbau des UV-Reaktors	48
Abbildung 35: Boxplot der Schwefelwasserstoffkonzentrationen.....	50
Abbildung 36: Mittelwerte der Schwefeldioxidkonzentration in den verschiedenen Versuchsphasen, .....	51
Abbildung 37: Schwefelbilanz für einzelne Tage aus den verschiedenen Versuchsphasen .....	52
Abbildung 38: Sichtfenster des UV-Reaktors mit gelbem Belag .....	53
Abbildung 39: links: neue Strahler vor dem Einbau in den UV-Reaktor; rechts: Strahler nach ca. 500 Betriebsstunden (12.09.2013).....	54
Abbildung 40: Strahlungsleistung einer neuen Lampe im Vergleich zur verbliebenen Strahlungsleistung von drei Lampen .....	54
Abbildung 41: Vor dem Aktivkohlefilter ausgebaute Rohrleitung mit pulverartigen Feststoffablagerungen .....	54
Abbildung 42: Schematische Darstellung eines Prüfröhrchens .....	58
Abbildung 43: Beispiel für das Verhalten der Odalogs nach Nullpunkts-Kalibrierung mit und ohne Regeneration.....	61
Abbildung 44: Online- und Handmessungen der Schwefelwasserstoffkonzentration im Roh- und Reingas ab dem 15.08. (Wiederinbetriebnahme der Anlage).....	62
Abbildung 45: Online- und Handmessungen der Schwefelwasserstoffkonzentration im Roh- und Reingas vom 25.07. (Inbetriebnahme) bis zum Ausfall der UEG Messung ....	62
Abbildung 46: Zuleitungen am Schwefelwasserstoffsensoren mit Ablagerungen .....	63

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Messstellen, Parameter, verwendete Messverfahren und – geräte, Häufigkeit der Probenahme.....	11
Tabelle 2: mittlere Schwefelwasserstoffkonzentration über dem Zulauf Sandfang 2010- 2013 für den Messzeitraum Juli bis einschließlich September.....	17
Tabelle 3: Sulfidgehalt im Zulauf von 2010-2013.....	17
Tabelle 4: Ergebnisse der Vergleichsmessung der Sulfidkonzentration im Zulauf .....	18
Tabelle 5: Ergebnisse der Zonen und Belüftermaterialien im Vergleich.....	25
Tabelle 6: Ergebnisse der Analyse der Kondensatproben.....	28
Tabelle 7: Ergebnisse der olfaktometrischen Messungen.....	29
Tabelle 8: Ergebnisse für Trockensubstanz und Katalase des Rücklaufschlammes (Biozönose) aus dem Becken 3.2 und im Vergleich aus einem Referenzbecken (4.1 oder 4.2).....	31
Tabelle 9: Schlammvolumenindex des Bebelungsbeckens 3.2 und eines Referenz- beckens über den Versuchszeitraum .....	31
Tabelle 10: Schalmindex des Vorjahres des Beckens 3.2 .....	32
Tabelle 11: Anzahl der Substitutionsversuche in den verschiedenen Zonen .....	34
Tabelle 12: Volumenstrom und Lampenanzahl im zeitlichen Verlauf .....	48
Tabelle 13: Mittlere Ozonkonzentrationen vor und nach dem Aktivkohlefilter .....	51
Tabelle 14: Grenzwerte für Schwefeldioxid über verschiedene Zeiträume und die zulässigen Überschreitungshäufigkeiten .....	52
Tabelle 15: Ergebnisse der olfaktometrischen Messung im Roh- und Reingas der UV Anlage.....	55
Tabelle 16: Gemessene Volumenströme zur Mitbehandlung und UV-Anlage in m <sup>3</sup> /h ....	57
Tabelle 17: Schwefelwasserstoffkonzentrationen zur Beginn und vor Eintritt in die Mitbehandlung.....	58
Tabelle 18: Messbereiche und Fehler des GA 5000.....	59
Tabelle 19: Mittelwert der Schwefelwasserstoffkonzentrationen im Rohgas über den gesamten Versuchszeitraum .....	59
Tabelle 20: CO <sub>2</sub> -Gehalt im Reingas.....	60

# 1. Einleitung

Schwefelhaltige, organische Verbindungen sind ein wesentlicher Bestandteil kommunalen Abwassers. Im Kanalnetz werden diese unter anaeroben Bedingungen u.a. zu Sulfiden und Schwefelwasserstoff umgesetzt. Je länger die Aufenthaltszeit und je höher die Abwassertemperatur, desto mehr organisches Material kann abgebaut werden. Folglich führen lange Aufenthaltszeiten zu erhöhten Sulfid- und Schwefelwasserstoffkonzentrationen im Abwasser. Dabei wird der Schwefelwasserstoff einerseits durch mikrobiellen Umsatz aus dem Sulfid gebildet, andererseits steht das Sulfid mit dem Schwefelwasserstoff im Gleichgewicht. Je nach pH-Wert liegt es entweder in dissoziierter Form als Sulfid oder bei niedrigen pH-Werten in undissoziierter Form als Schwefelwasserstoff vor.

Beim Übergang von Druckleitungen zu Frei-Gefälleleitungen gast der Schwefelwasserstoff anschließend aus.

Die Bildung von Schwefelwasserstoff ist aus mehreren Gründen zu vermeiden. Zum einen verursacht Schwefelwasserstoff Korrosion an Bauteilen im Kanalnetz, zum anderen ist er bereits ab 3 ppm als unangenehmer Geruch wahrnehmbar und zudem „ein toxisch wirkender Gefahrenstoff“ (Weismann et al. 2007). Die Auswirkungen auf den Menschen reichen angefangen von Schleimhautreizungen bis hin zum Atemstillstand. Festgelegt ist daher ein Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) von 5 ppm.

Eine Gefährdung des Menschen durch Schwefelwasserstoff tritt vor allem dort auf, wo die Ausgasung durch Turbulenzen in der Strömung begünstigt wird. So auch im belüfteten Sandfang der Kläranlage (KA) Schönerlinde. In den Sommermonaten wurden nach Untersuchungen von Stolzenbach, in der unmittelbaren Umgebung des Sandfangs Schwefelwasserstoffkonzentrationen von bis zu 3500 ppm gemessen. Dies beeinträchtigte den Anlagenbetrieb deutlich, da Wartungsarbeiten an der Anlage nicht ungehindert durchgeführt werden konnten. Es wurde folglich nach einem geeigneten Verfahren gesucht, um die Schwefelwasserstoffkonzentration in der Abluft des Sandfangs unter den AGW zu senken.

Im Projekt „Abluft“ wurden Vorversuche zu zwei verschiedenen Behandlungsverfahren im Pilotmaßstab durchgeführt. Zum einen zur Mitbehandlung der Abluft in der Belebungsstufe der Kläranlage, zum anderen zur UV-Oxidation.

Das Kompetenzzentrum Wasser Berlin (KWB) hatte die Aufgabe, beide Konzepte hinsichtlich der Verringerung der Schwefelwasserstoffkonzentration zu vergleichen und unter Einbeziehung betrieblicher Aspekte zu bewerten. Dafür wurde in Abstimmung mit den Berliner Wasserbetrieben (BWB) ein Versuchsprogramm entwickelt, die Probenahmepläne erstellt und die Probenahme durchgeführt.

Zudem wurde der Betrieb der Versuchsanlagen durch Betriebskontrollen und Einstellung der für die Versuche notwendigen Anlagenparameter durch das KWB unterstützt. Die während der Versuchsphase gesammelten Daten wurden anschließend vom KWB aufbereitet, ausgewertet und eine Abschätzung der Betriebskosten erstellt.

## 2. Versuchsanordnung auf der Kläranlage

In Abbildung 1 ist ein Überblick über die Versuchsanordnung auf der Kläranlage zu sehen. Die Ablaufrinne des Sandfangs wurde abgedeckt, um die eingebrachte Luft gezielt abzuführen und behandeln zu können. Zusätzlich zur regulären Belüftung wurden 500 Nm<sup>3</sup>/h Luft in die abgedeckte Ablaufrinne des belüfteten Sandfangs der KA eingebracht, um damit den Schwefelwasserstoff auszustrippen. Die Anlage wurde bei Überschreiten der unteren Explosionsgrenze automatisch abgeschaltet. Dafür wurden die Schwefelwasserstoff- und Methankonzentration unter der Abdeckung erfasst.

Die mit Schwefelwasserstoff angereicherte Abluft (Rohgas) wurde über zwei getrennte Rohrleitungen abgeführt. 150-250 m<sup>3</sup>/h wurden über einen Ventilator in die UV-Anlage gezogen. 240 Nm<sup>3</sup>/h wurden über ein Gebläse in die Mitbehandlung im Becken 3.2 geleitet. Nach der Behandlung in der UV-Anlage oder Mitbehandlung wurde die gereinigte Abluft (Reingas) in die Umgebung geleitet (s. Abbildung 1)

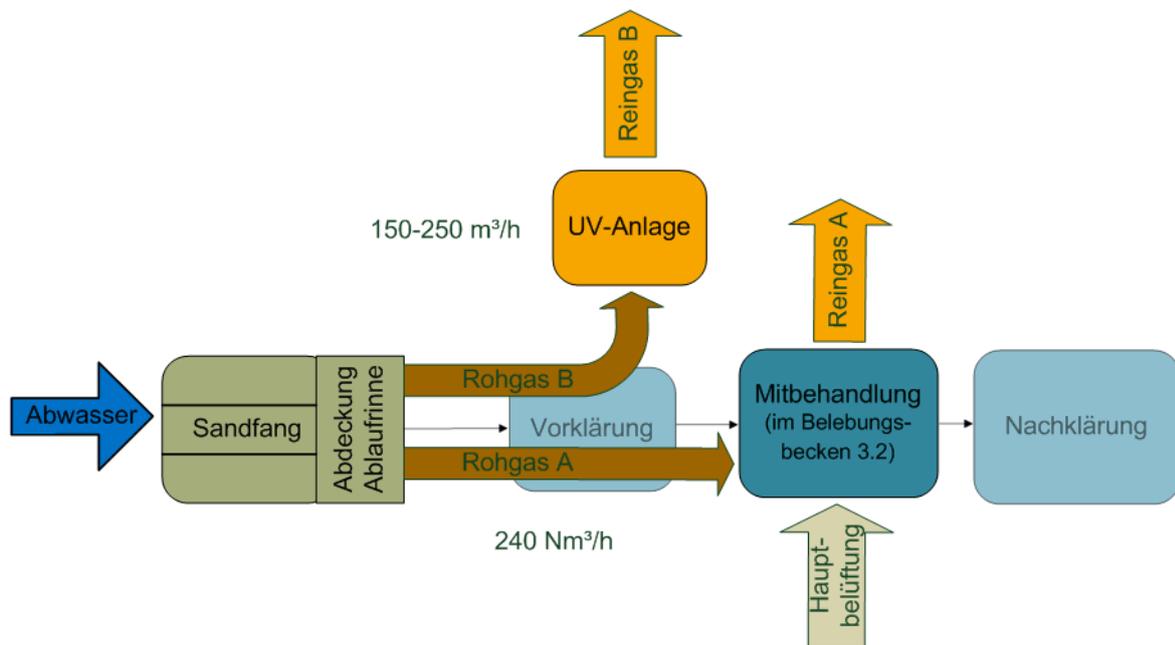


Abbildung 1: Schematische Anordnung der Versuchsanlagen auf dem Gelände der Kläranlage

Abbildung 2 gibt einen zeitlichen Überblick über den Betrieb der beiden Anlagen. Die Versorgung der beiden Anlagen war erst ab Mitte August möglich. Davor führte eine fehlerhafte Methanmessung zu häufigen Abschaltungen der Anlage.

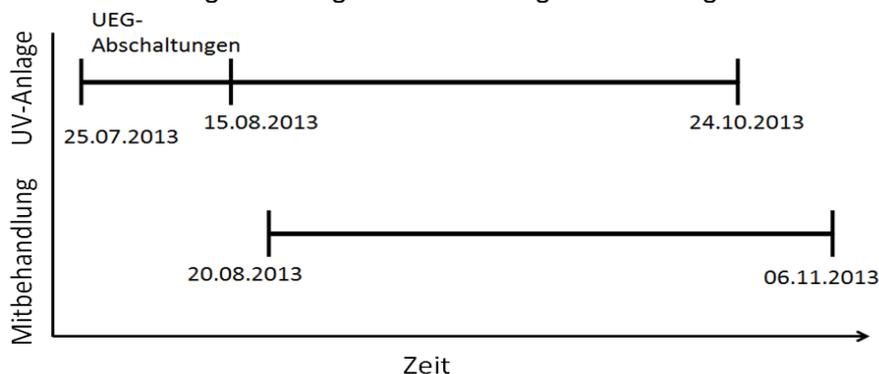


Abbildung 2: Überblick zeitlicher Ablauf der Versuche

## 2.1 Messstellen und –technik

An beiden Versuchsanlagen wurden feste Messpunkte für die regelmäßige Probenahme angeordnet. Wasser-, Roh- und Reingas-, sowie Feststoffproben wurden an diesen Stellen genommen (s. Abbildung 3). An Wasser-Messstellen wurden nur Handmessungen durchgeführt. Mit Ausnahme der Messstellen in der Zuleitung zur Mitbehandlung (Messstelle Rohgas A), wurde für die Messungen im Roh- und Reingas neben den Handmessungen Onlinemesstechnik verwendet. Auch einzelne olfaktometrische Messungen von Roh- und Reingas wurden durchgeführt.

Einen Überblick über die Messstellen, gemessenen Parameter, verwendete Messverfahren und –geräte, sowie die Häufigkeit der Messungen ist in Tabelle 1 gegeben.

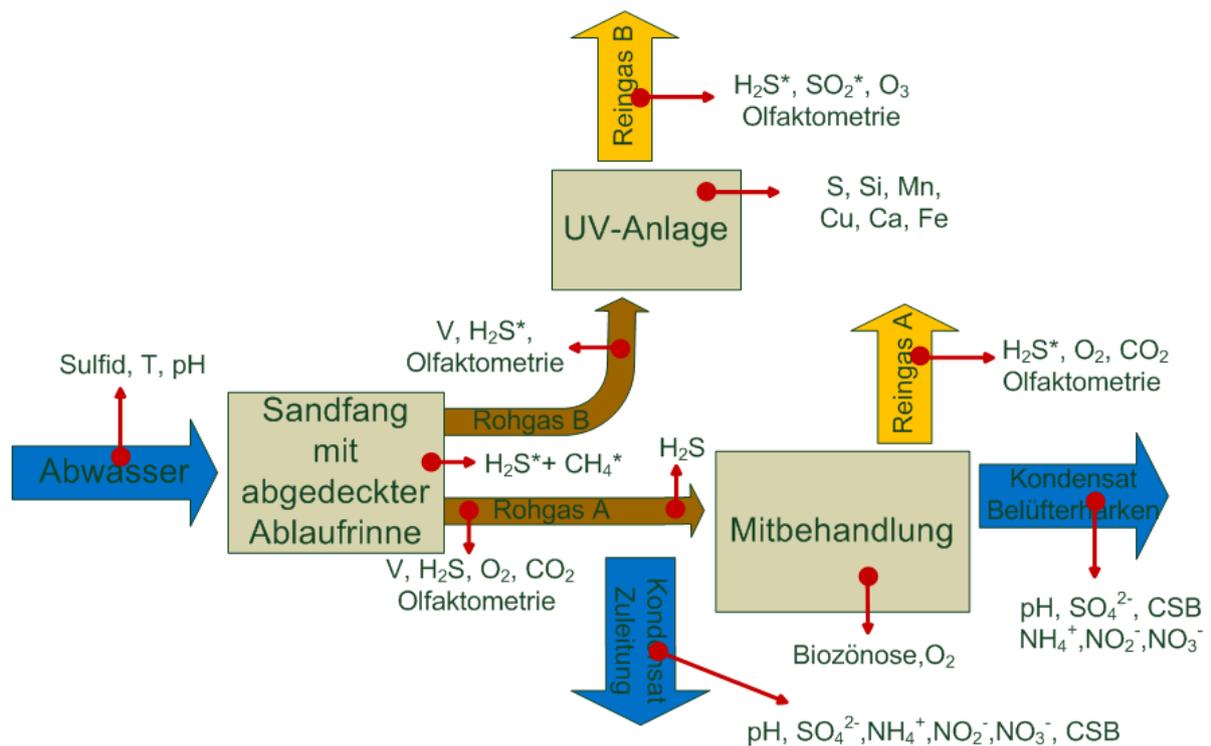


Abbildung 3: Probenahmestellen und gemessene Parameter an beiden Versuchsanlagen; die mit einem\* gekennzeichneten Parameter wurden mittels Handmessungen und Onlinemesstechnik erfasst

Tabelle 1: Übersicht über die Messstellen, Parameter, verwendete Messverfahren und –geräte, Häufigkeit der Probenahme. Die routine-Probenahme (PN) erfolgte mit Ausnahme der Biozönose i.d.R. drei Mal pro Woche durch das KWB

Messstelle	Parameter	Messgerät	Messbereich	Probenahmeintervall	Analyse durch
Wasser					
Zulauf	Temperatur	Digitalthermometer, Checktemp 1	-20 bis +90°C	3 mal pro Woche	KWB
	Sulfid gelöst	DIN 38405-D26			Wessling Laboratorien GmbH
	Sulfid leicht freisetzbar/gesamt	DIN 38405-D27			
	pH-Wert	HQ30D, Hach-Lange,	0-14		
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	DIN EN ISO 10304/1-E20 (D20)		Labor BWB	
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Küvettest, Hach Lange			
Kondensat	pH-Wert	pH 3110 SET 3 von WTW, pH Elektrode Sentix 81, pH-Papier	0-14	3 mal pro Woche	KWB
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	DIN EN ISO 10304/1-E20 (D20)		Labor BWB	
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Küvettest, Hach Lange			
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>				
	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>				
	CSB				
Belebungsbecken	O <sub>2</sub>		YSI pro ODO	0-20 mg/L	
		WTW ProfiLine Oxi 1970	0-20 mg/L	mobile elektrochemische Sonde	
		Oxymax W COS31, Endress und Hauser	0-60 mg/L	Stat. Elektrochemische Sonde	
	Biozönose			Alle zwei Wochen	Durch Labor BWB

Gas					
Unter der Abdeckung Sandfang	H <sub>2</sub> S	GA 5000 (Gasanalyser) H <sub>2</sub> S-Sensor Ex-Tox:Sens H <sub>2</sub> S-EC	0-3000 ppm	Stündliche Online-Messung	
	CH <sub>4</sub>	Infrarotmessung		Stündliche Online-Messung	
Rohgas A und B	H <sub>2</sub> S	Gastec Prüfröhrchen	0,1-10.000 ppm	1-3 pro Tag	KWB
	H <sub>2</sub> S	GA 5000 (Gasanalyser)	1-10.000 ppm	1-3 pro Tag	KWB
	Geschwindigkeit	Testo 452, 12mm Aufsatz	0,6-20,0 m/s	Max. 3 mal pro Tag	
Rohgas A	O <sub>2</sub>	GA 5000 (Gasanalyser)	0-60 Vol. %	1-3 mal pro Tag	
	CO <sub>2</sub>		0-25 Vol. %		
Rohgas B	H <sub>2</sub> S	GA 5000 (Gasanalyser) H <sub>2</sub> S-Sensor Ex-Tox:Sens H <sub>2</sub> S-EC	0-3000 ppm	Stündliche Online-Messung	
Reingas A und B	H <sub>2</sub> S	Gastec Prüfröhrchen GA 5000 (Gasanalyser)	0,1-10.000 ppm	Bis zu drei mal pro PN-Tag	KWB
			1-10.000 ppm		
Reingas A	H <sub>2</sub> S	Odialog	1-200 ppm	Alle 10 min, Online-Messung	
	O <sub>2</sub>	GA 5000 (Gasanalyser)	0-60 Vol. %	max. 3 mal pro Tag	KWB
	CO <sub>2</sub>		0-25 Vol. %		
Reingas B	H <sub>2</sub> S	GA 5000 (Gasanalyser)	1-10.000	Max. 3 mal pro Tag	KWB
		H <sub>2</sub> S-Sensor Ex-Tox: Sens H <sub>2</sub> S-EC	0-3000	Stündliche Online-Messung	
	SO <sub>2</sub>	Gastec Prüfröhrchen	0,05-3600 ppm	1-3 mal pro Tag	KWB
	O <sub>3</sub>		0,025-3 ppm		

Feststoffe					
UV-Reaktor	Schwefel	Aufschluss mit Königswasser: DIN EN 13346 Analyse: DIN EN ISO 11885 (E22)		12.09.2013 (Belag Strahler) 24.10.2013 (Ablagerungen im Reaktor)	Wessling Laboratorien GmbH
UV-Reaktor	Silicium	Aufschluss mit Königswasser nach DIN EN 13346 Analyse: DIN EN ISO 11885 (E22)		12.09.2013 (Belag Strahler) 24.10.2013 (Ablagerungen im Reaktor)	Wessling Laboratorien GmbH
	Mangan				
	Kupfer				
	Calcium				
	Eisen				
UV-Reaktor	Verbliebene Lampenleistung nach 3 Wochen Betrieb bei 254 nm und 185 nm	254nm: RM21 Sensor von Gröbel 185nm: VUV Meter von Jenoptik Berlin	0-100 W/m <sup>2</sup>	nach Abbau der Anlage (24.20.2013)	UV-Technik Speziallampen GmbH
Belüfterelemente					
	Druckverlust	Prüfstand BWB		Nach Ausbau	BWB-Prüfstand
	Materialprüfung auf Ablagerungen und Korrosion	Nach DIN 30692-2		Nach Ausbau	KIWA MPA

Wasser-Messungen im Abwasserzulauf:

- Probenahme im Zulauf zum belüfteten Sandfang
- Die Sulfidproben wurden direkt vor dem Einlauf des Abwassers in den belüfteten Sandfang genommen.

Kondensatentleerung:

- Die Kondensatentleerung für die Zuleitung, aus der die Probe entnommen wurde, befand sich ca. 1 m vor den ersten Belüfterharken

Belebungsbecken:

- Es wurden bei der Sauerstoffmessung im Abwasser zwei Sondentypen mit unterschiedlichen Messverfahren (optisch und elektrochemisch) verwendet, um zu überprüfen, ob es eine Querempfindlichkeit der elektrochemischen Messung zu Schwefelwasserstoff gibt. Die genaue Lage der Messstellen im Belebungsbecken ist der Abbildung 10 in Kapitel 4.1 zu entnehmen

Roh- und Reingas Messungen:

- Die Schwefelwasserstoffkonzentration wurde sowohl mittels Online-Messtechnik, als auch durch zwei verschiedene Handmessverfahren bestimmt. Bei der Online-Messung handelt es sich um eine diskontinuierlich Messung mit 1-stündiger Auflösung (s. Tabelle 1).

## 2.2 Messprinzip der Handmessungen in der Gasphase

Volumenstrommessung:

- Die Geschwindigkeitsmessung mit dem Flügelrad wurde in der Zuleitung zum Verdichter und unmittelbar vor dem UV-Reaktor quer zur Strömungsrichtung durchgeführt. Das Rad wurde langsam über den Rohrquerschnitt bewegt (s. Abbildung 4). Es wurden die Geschwindigkeiten über den Rohrquerschnitt erfasst und automatisch der Mittelwert ausgegeben. Pro Messung wurde die mittlere Geschwindigkeit über den Rohrquerschnitt dreimal ermittelt.



Abbildung 4: Messung mittels Flügelradmesser im Rohgas zur Mitbehandlung

Prüfröhrchen:

- Die Handmessungen mittels Prüfröhrchen wurden für die Mitbehandlung und die UV-Anlage nach dem gleichen Prinzip durchgeführt. Dazu wurde das Gas mittels

einer Vakuum-Handpumpe (Modell GV-100S bzw. GV-110S) direkt aus dem Rohr in das Prüfröhrchen gesogen. Um eine Verdünnung durch Außenluft zu verhindern wurde zwischen Rohr und Pumpe ein Dichtungsring gelegt (s. Abbildung 5).

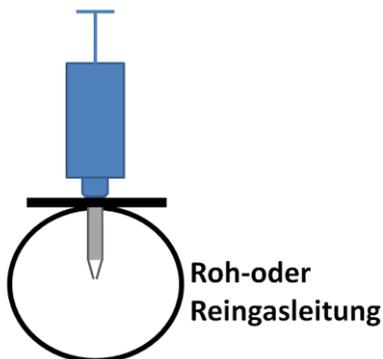


Abbildung 5: Messprinzip der Prüfröhrchen, Darstellung über den Rohrquerschnitt

GA 5000 (Gasanalyser):

- Für die Messung mit dem GA 5000 wurde die Öffnung der jeweiligen Messstelle mit einem perforierten Stopfen verschlossen und der Schlauch, über den das Gas in den GA 5000 gesogen wurde, durch die Öffnung mittig in das Rohr eingehängt. Durch einen weiteren Schlauch wurde das gemessene Gas abgeleitet (s. Abbildung 6). Es wurde vor jeder Messung der Umgebungsdruck (ohne angeschlossene Schläuche), sowie die Differenz zwischen dem Umgebungsdruck und dem Druck in der Rohrleitung ermittelt und die gemessene Konzentration entsprechend korrigiert. Dies erfolgte automatisch im Gerät, es wurde nur die korrigierte Konzentration ausgegeben.

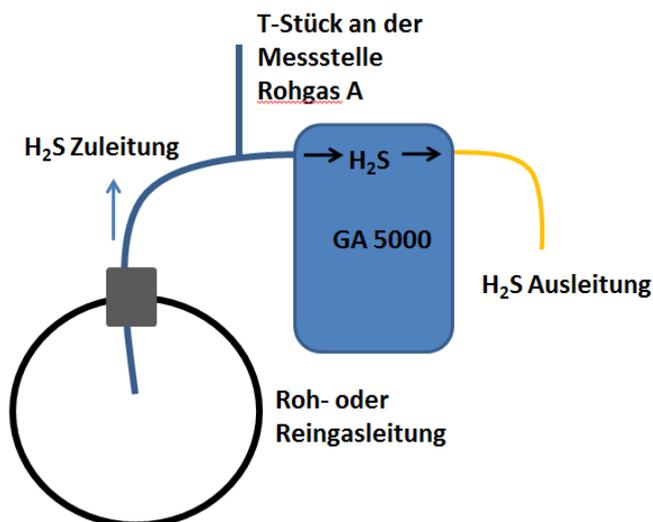


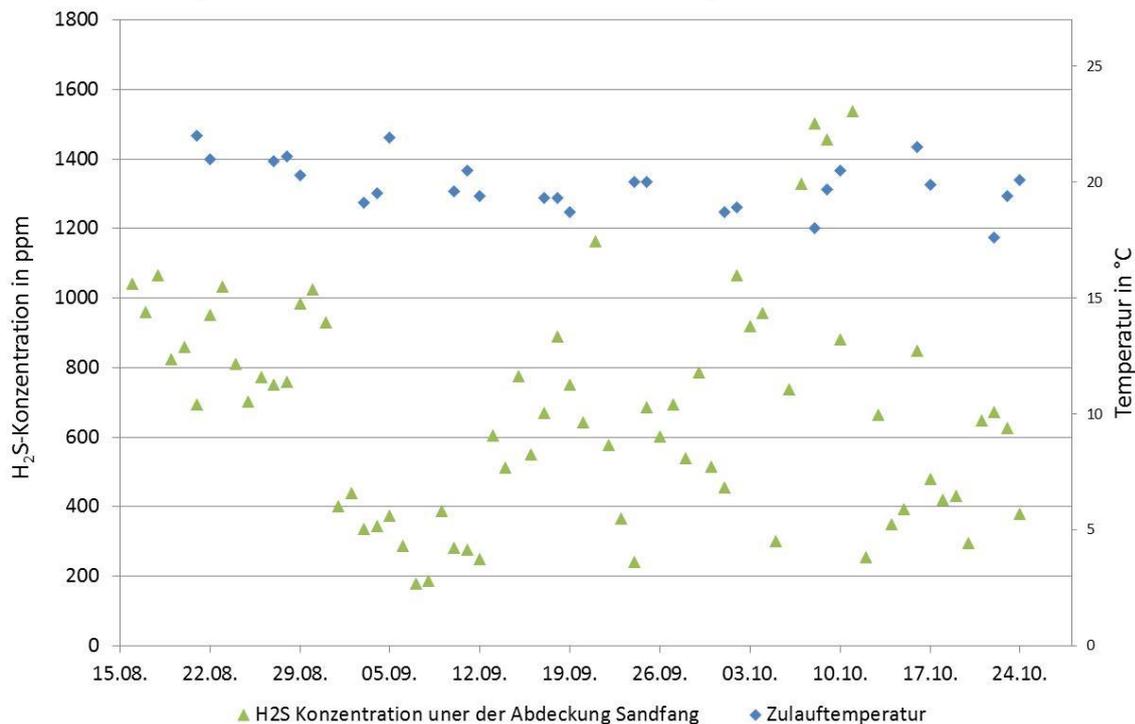
Abbildung 6: Messaufbau mit dem GA 5000

- An der Rohgasmessstelle der Mitbehandlung (Rohgas A) wurde das Gas über ein T-Stück abgeführt. Das eine Ende des T-Stückes war mit dem GA 5000 verbunden, das andere Ende war frei, um einen Überdruck am GA 5000 zu vermeiden. Die Gaszufuhr wurde über einen Kugelhahn reguliert und die Druckverhältnisse vor jeder Messung ermittelt (s.o.).

### 3. Charakterisierung des Rohabwassers (Zulauf zur KA)

Für den Betrieb der Kläranlage und damit auch für die auf dieser Anlage durchgeführten Versuche waren Zusammensetzung, Menge und Temperatur des Abwasserzulaufs relevant. Dabei beeinflussten die Sulfidmenge im Abwasser, die Abwasserzusammensetzung und -temperatur die Schwefelwasserstoffbildung maßgeblich. Je länger die Verweilzeit im Kanal- und ADL-Netz, desto weiter waren die im Abwasser stattfindenden Abbauprozesse fortgeschritten. Wurde die Zulaufmenge z.B. durch Regen erhöht, waren ein Frachtstoß sowie eine anschließende eine Verdünnung der Sulfidkonzentration im Abwasser zu erwarten.

Abbildung 7 zeigt den Verlauf der Schwefelwasserstoffkonzentration unter der Abdeckung des Sandfangs zusammen mit den gemessenen Temperaturen. Im Mittel betrug die Schwefelwasserstoffkonzentration ca. 634 ppm und schwankt zwischen 0 und 3001 ppm. Die Zulauftemperatur lag über den Versuchszeitraum im Mittel bei 20.0 °C und schwankt zwischen 17.6 °C und 22.0 °C. Die Sulfatkonzentration im Zulauf lag während des Versuchszeitraumes im Mittel bei 81.4 mg/l (n=11). In Bezug auf den Zusammenhang mit den im Zulauf gemessenen Sulfidkonzentrationen kann keine Aussage getroffen werden, da die gemessenen Sulfidwerte nicht plausibel waren (s.u.), eine Auflistung aller im Zulauf gemessenen Parameter ist dem Anhang A zu entnehmen.



**Abbildung 7: Verlauf der Schwefelwasserstoffkonzentration (24-Stunden-Mittelwerte) unter der Abdeckung des Sandfangs und Zulauftemperatur über den Versuchszeitraum. Niederschlagsdaten vom deutschen Wetterdienst, Wetterstation Tegel.**

Die  $H_2S$ -Konzentrationen in der Gasphase lagen für die Zeiträume Juli bis einschließlich September 2010, 2011, 2012 nach Untersuchungen von Stolzenbach zwischen 260 ppm und 3320 ppm, die Mittelwerte sind der Tabelle 2 zu entnehmen. Der Wert der durchschnittlichen Schwefelwasserstoffkonzentration in 2013 ist niedriger, da dieser online gemessen und damit die große Schwankungsbreite, sowie die generell niedrigen Konzentrationen in den Nachtstunden erfasst wurden.

**Tabelle 2: mittlere Schwefelwasserstoffkonzentration über dem Zulauf Sandfang 2010-2013 für den Messzeitraum Juli bis einschließlich September**

Messzeitraum	Mittelwert in ppm	Anzahl der Messungen
07.-09.2010	1381	16
07.-09.2011	1868	6
07.-09.2012	1787	12
07.-09.2013	560	10101

Nach den Ergebnissen der Sulfidmessung von Stolzenbach 2011 lagen die Konzentrationen für gelöstes und leicht freisetzbares Sulfid im Mittel noch bei 14,7 mg/l und 23,3 mg/l (s. Tabelle 3).

Ab dem Jahr 2012 war kaum noch Sulfid im Zulauf vorhanden. Im Mittel betrug die Konzentration an gelöstem Sulfid 0,2 mg/l und an leicht freisetzbarem Sulfid 0,6 mg/l. Die Messungen des Jahres 2013, die während der Versuchsphase dieses Projektes durchgeführt wurden, zeigen ebenfalls sehr niedrige Sulfidkonzentration im Zulauf zur Kläranlage. Die verringerte Sulfidkonzentration spiegelt sich jedoch nicht in den H<sub>2</sub>S-Konzentrationen wieder. Diese sind in 2011 und 2012 mit 1868 ppm und 1787 ppm ähnlich. Erst im Jahr 2013 ist die gemessene H<sub>2</sub>S-Konzentration geringer, die starke Verringerung der Sulfidkonzentration wurde jedoch zwischen den Jahren 2011 und 2012 gemessen. Zudem ist die gemessene Verringerung der Sulfidkonzentration ungleich größer als das Absinken der H<sub>2</sub>S-Konzentrationen.

**Tabelle 3: Sulfidgehalt im Zulauf von 2010-2013, unterschiedliche Anzahl der Messungen, da Werte z.T. unterhalb des Messbereiches**

Messzeitraum	Mittelwert Sulfidkonzentration in mg/l		Anzahl der Messungen	
	gelöst	leicht freisetzbar	gelöst	Leicht freisetzbar
07.-09.2010	25,9	35,1	16	16
07.-09.2011	14,7	23,3	15	16
07.-09.2012	0,2	0,6	10	13
07.-09.2013	0,8	0,64	6	5

Die Sulfidkonzentration ist ein wesentlicher Parameter zur Abschätzung der Bildung von Schwefelwasserstoff. Die in diesem und im letzten Jahr ermittelten Sulfidwerte (2013 und 2012) wurden daher in Frage gestellt und eine Vergleichsmessung bei einem anderen Labor in Auftrag gegeben. Es wurde eine parallele Bestimmung der Sulfidkonzentration durch zwei verschiedene Labore durchgeführt. Zur selben Zeit wurden an derselben Stelle die Proben dafür genommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt.

Die Proben, die vom Labor Wessling analysiert wurden, wurden durch das KWB genommen und mittels einer Druckfiltration mit Stickstoff filtriert. Die Probenflaschen wurden mit Stickstoff gespült und unter minimalem Luftkontakt befüllt, um eine Oxidation des Sulfids an der Luft auszuschließen. Die Filtration erfolgte ebenfalls unter minimalem Luftkontakt mittels Stickstoff. Sowohl das Spülen der Probengefäße mit Stickstoff, als auch die Stickstofffiltration sind in der entsprechenden DIN Norm nicht vorgesehen. Sie wurden aufgrund der nicht plausiblen Ergebnisse des Vorjahres (s.o.) zur Sicherheit

durchgeführt. Die vom Labor UCL verwendeten Probenflaschen hingegen waren nicht mit Stickstoff gespült. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Parallelbestimmung dargestellt.

**Tabelle 4: Ergebnisse der Vergleichsmessung der Sulfidkonzentration im Zulauf, für die Ergebnisse des Mitbewerbers sind die Mittelwerte der Dreifachbestimmung angegeben**

Datum	Sulfid gelöst [mg/l]		Sulfid leicht freisetzbar [mg/l]	
	Wessling	UCL	Wessling	UCL
08.10.2013	<0,1	25,7	0,1	31,7
09.10.2013	0,2	30,7	0,4	33,7

Die von UCL bestimmten Konzentrationen liegen trotz weniger aufwendiger Probenvorbereitung im erwarteten Bereich (s. Tabelle 4). Aus den Ergebnissen geht hervor, dass es sich bei den nicht plausiblen Sulfidwerten wahrscheinlich um eine fehlerhafte Messung seitens der Wessling Laboratorien GmbH handelt. Für weitere Messkampagnen wird empfohlen, die Messung zu überprüfen.

## 4. Versuche an der Mitbehandlung

Bei dem Verfahren der Mitbehandlung wurde die schwefelwasserstoffhaltigen Abluft über Belüfterelemente zusätzlich zur Hauptbelüftung ins Belebungsbecken eingebracht. Die schwefelwasserstoffhaltigen Gasblasen stiegen wie die Blasen der Hauptbelüftung nach oben an die Wasseroberfläche. Dabei diffundierte der Schwefelwasserstoff von der Gas- in die Flüssigphase. Der Schwefelwasserstoff wurde im Abwasser gelöst. Grundsätzlich ist die Löslichkeit von Schwefelwasserstoff in Wasser mit 3,6 g/l bei 20°C sehr hoch.

Die Menge, die absorbiert werden kann, ist abhängig von der Abwassertemperatur, dem Abwasserdurchsatz, den verwendeten Belüfterelementen und der Kontaktzeit zwischen Abwasser und Gasblasen.

Der gelöste Schwefelwasserstoff dissoziierte in Abhängigkeit vom pH-Wert zu Hydrogensulfid und Sulfidionen und wurde von den im Abwasser vorhandenen Bakterien zu Sulfat umgesetzt. In Anwesenheit von Sauerstoff kann die Umsetzung der entstehenden Sulfide zu Sulfat ebenfalls durch chemische Autooxidation erfolgen. Diese Reaktion läuft im Vergleich zur mikrobiologischen Umsetzung sehr langsam ab.

Bei einer durchschnittlichen Schwefelwasserstoffkonzentration der unbehandelten Abluft von 563 ppm (Mittelwert der Online-Messung) und einem Abluftvolumenstrom von 240 Nm<sup>3</sup>/h, was einem Abluftvolumenstrom von 258 m<sup>3</sup>/h bei 20°C entspricht, mussten ca. 220 g/h an Schwefelwasserstoff im Belebungsbecken gelöst werden. Bei einem durchschnittlichen Abwasserzufluss zum Becken 3.2 von 360 m<sup>3</sup>/h entsprach dies 0,85 g/m<sup>3</sup>.

Unter der Annahme einer idealen Durchmischung sind unter den oben genannten Bedingungen theoretisch maximal ca. 1270 kg/h, d.h. 4,9 kg/m<sup>3</sup>, an Schwefelwasserstoff löslich.

Während der Versuchsdauer schwankte die Abwassertemperatur nur geringfügig und hatte damit wenig Auswirkungen auf die Löslichkeit (s. Kapitel 3)

### 4.1 Aufbau der Mitbehandlung

Die Versuchsanlage für die Mitbehandlung befand sich in einem ausgewählten Becken der biologischen Stufe der Kläranlage, dem Becken 3.2. Dort wurde Abwasser in einem separaten Kanal mittig durch das Becken geführt und in die anoxische Zone eingeleitet. Das Abwasser durchlief die aeroben Zonen 0-3 dieses Beckens (s. Abbildung 8) bevor es in die Nachklärung eingeleitet wurde.

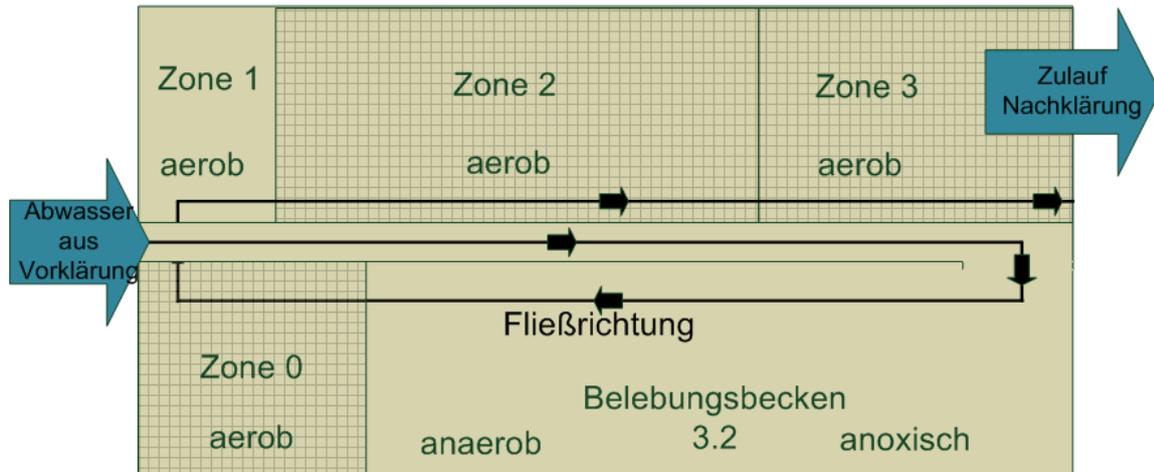


Abbildung 8: Überblick über das Becken 3.2 und seine Einteilung in Zonen (es besteht keine bauliche Trennung zwischen den Zonen), die Zonen, die mit Gitternetzlinien hinterlegt sind wurden mit Abluftbelüftern ausgestattet



Abbildung 9: links: Anordnung der Rohgas-Belüfterstränge; rechts: Belüfterharken

Für den Versuchszweck wurden in den aeroben Zonen 0, 2 und 3 des Belebungsbeckens Belüfterstränge (im Weiteren als Rohgas-Belüfter bezeichnet) für die Zufuhr der Abluft zusätzlich zu der regulären Belüftung (im Weiteren als Hauptbelüftung bezeichnet) installiert (s. Abbildung 7). Diese bestanden aus zwei verschiedenen Materialien, Silikon und thermoplastisches Polyurethan (TPU), damit die Eignung dieser Materialien getestet werden konnte. Die im Gebläse auf  $240 \text{ Nm}^3/\text{h}$  verdichtete Abluft (Rohgas) wurde über eine Schlauchleitung den Rohgas-Belüftersträngen zugeführt. Jeder Rohgas-Belüfterstrang konnte einzeln geöffnet oder geschlossen werden.

In einem Belüfterstrang waren ausschließlich Membranmodule aus demselben Material verbaut. Es wurden immer mehrere Belüfterstränge aus demselben Material nebeneinander angeordnet (s. Abbildung 9). Innerhalb des Belebungsbeckens wechselten die Bereiche mit und ohne Rohgas-Belüftern (s. Abbildung 10). Die Abluft wurde wie die Hauptbelüftung des Beckens von unten feinblasig eingebracht und stieg an die Wasseroberfläche. In der Kontaktzeit zwischen Abluft und Abwasser, löste sich der Schwefelwasserstoff und wurde vermutlich mikrobiologisch zu Sulfat umgewandelt.

Über den Zonen der Rohgas-Belüfter wurden schwimmende Hauben auf der Belegung montiert, um die behandelte Abluft, die im Weiteren als Reingas bezeichnet wird, aufzufangen (s. Abbildung 11).

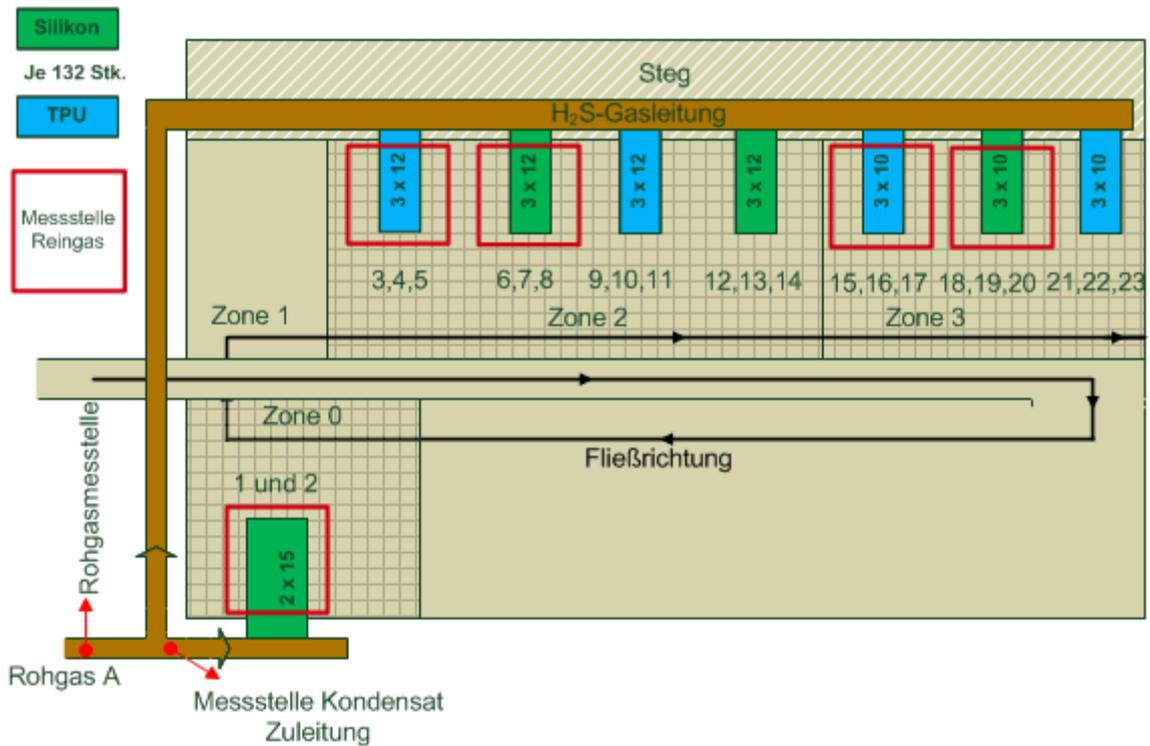


Abbildung 10: Schematischer Aufbau der Mitbehandlung inklusive der Probenahmestellen (rote Pfeile: Rohgas- und Kondensatmessstelle). Die Anzahl der Belüfter ist in den entsprechenden Symbolen verzeichnet: Anzahl der Belüfterstränge x Belüfteranzahl pro Strang, die Stränge selbst sind von 1-23 nummeriert



Abbildung 11: schwimmende Haube auf dem Becken 3.2 zum Auffangen des Reingases

## 4.2 Versuchsprogramm

Mit den Vorversuchen an der Mitbehandlung sollten mehrere Fragestellungen geklärt werden:

1. Ist die Mitbehandlung in der Lage,  $H_2S$  Emissionen wie gewünscht zu verringern?
2. Ab welcher spezifischen Beaufschlagung je Belüfterelement ist Schwefelwasserstoff im Reingas festzustellen (Durchbruch)?
3. Gibt es Unterschiede zwischen den beiden Belüftertypen?
4. Gibt es Unterschieden beim Abbaugrad zwischen den Zonen?
5. Ist die Verringerung der Emissionen auch über einen längeren Zeitraum stabil?
6. Welche Eigenschaften weist das in der Zuleitung und in den Belüfterharken gebildete Kondensat auf?
7. Wird die Geruchsstoff-Konzentration unter den Grenzwert von  $500GE/m^3$  gesenkt?

Die Fragen 8 und 9 konnten mit dem Versuchsaufbau nur teilweise geklärt werden:

8. Hat die Abluft Einfluss auf die Biozönose?
9. Bis zu welchem Grad kann die Hauptbelüftung durch Abluft ersetzt werden (Substitution)?
10. Zeigen die im Belebungsbecken installierten elektrochemischen Sauerstoffsonden eine Querempfindlichkeit zu Schwefelwasserstoff, die in dem Messprinzip begründet ist?

Für die Versuche galten folgende Rahmenbedingungen:

Es wurden verschiedene Versuche unter Variation des Volumenstroms durchgeführt. Der Gesamtgasstrom der Abluft von  $240\text{ Nm}^3/\text{h}$  wurde dabei nicht verändert, durch Öffnen und Schließen der Belüfterstränge wurde die Gasmenge auf die entsprechenden Belüfterstränge unterschiedlich verteilt.

Es wurden immer nur Belüfterstränge eines Typs (Silikon oder TPU) gleichzeitig geöffnet, da die verschiedenen Materialien unterschiedliche Druckeigenschaften haben und bei parallelem Betrieb die Abluft nicht gleichmäßig auf die beiden Typen verteilt worden wäre.

Eine hohe spezifische Beaufschlagung der einzelnen Belüfterelemente ( $6-8\text{ Nm}^3/\text{h}$ ) konnte aufgrund der begrenzten Abluftmenge nicht in mehreren Zonen gleichzeitig umgesetzt werden. Waren alle Belüfterstränge eines Typs geöffnet lag die spezifische Beaufschlagung bei  $1,82\text{ Nm}^3/\text{h}$  ( $240\text{ m}^3/\text{h}$  aufgeteilt auf 132 Belüfter eines Typs).

Eine vollständige Darstellung des Versuchsprogramms ist in Anhang B zu finden.

## 4.3 Versuchsdurchführung an der Mitbehandlung, Ergebnisdarstellung und Diskussion

Im Folgenden werden die an der Mitbehandlung zu den einzelnen Fragestellungen durchgeführten Versuche vorgestellt und ausgewertet. An erster Stelle stand dabei die Frage nach der Reinigungsleistung:

1. Ist die Mitbehandlung in der Lage, H<sub>2</sub>S Emissionen wie gewünscht zu verringern?
2. Ab welchem Volumenstrom ist Schwefelwasserstoff im Reingas festzustellen (Durchbruch)?

Folgende Einstellungen wurden dazu an der Mitbehandlung getestet:

- Spezifische Beaufschlagung der Silikonbelüfter für mindestens 30 Minuten mit 1,8 Nm<sup>3</sup>/h, 4 Nm<sup>3</sup>/h, 5 Nm<sup>3</sup>/h, 5,3 m<sup>3</sup>/h, 5,7 Nm<sup>3</sup>/h, 6 Nm<sup>3</sup>/h und 8 Nm<sup>3</sup>/h
- Spezifische Beaufschlagung der TPU-Belüfter von für mindestens 30 Minuten mit 1,8 Nm<sup>3</sup>/h, 4 Nm<sup>3</sup>/h, 5 Nm<sup>3</sup>/h, 6,7 Nm<sup>3</sup>/h und 8 Nm<sup>3</sup>/h

Aus diesen Versuchen ging hervor, dass die aus dem belüfteten Sandfang abgezogene Abluft, deren Schwefelwasserstoffkonzentration im Mittel bei 634 ppm lag und zwischen 0 und 3001 ppm schwankte (s. Kapitel 3), an der Messstelle im Rohgas zur Mitbehandlung (Messstelle Rohgas A) ebenfalls eine große Schwankungsbreite zwischen 200 ppm und 1800 ppm aufwies (s. Abbildung 12). Die geringere Maximalkonzentration ist darauf zurückzuführen, dass beim Ableiten der Abluft aus dem Sandfang Umgebungsluft mitgezogen wurde, da die Abdeckung an den Seiten nicht abgedichtet war und eine Verdünnung nicht ausgeschlossen werden konnte. In Abbildung 12 sind die Summenkurven und Mittelwerte der Online-Messung unter der Abdeckung des belüfteten Sandfangs, sowie im Rohgas der UV-Anlage und die Handmessungen im Rohgas der Mitbehandlung und UV-Anlage dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass sich die Konzentration im Rohgas, das in die UV-Anlage geführt wurde, nicht wesentlich von der Konzentration des Rohgases, das in die Mitbehandlung geleitet wurde, unterschieden hat. Die Daten der Online-Messung sind auf der beiliegenden CD hinterlegt, die der Handmessung im Anhang C und I.

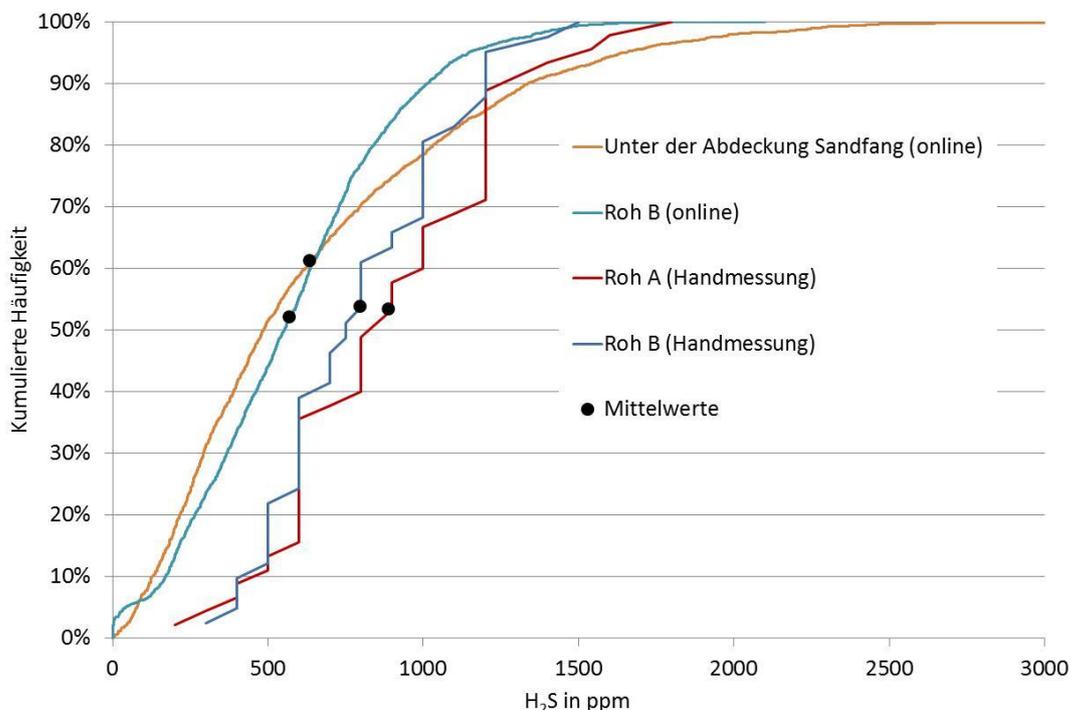
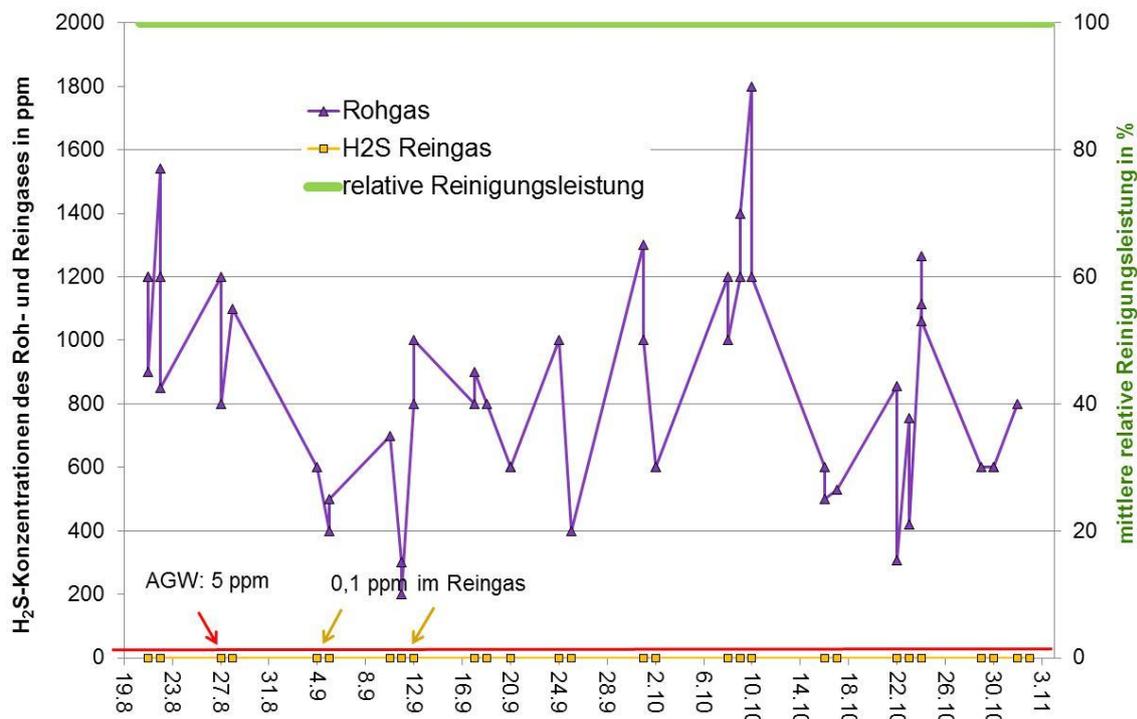


Abbildung 12: Kumulierte Häufigkeiten und Mittelwerte

Im Mittel lag die Schwefelwasserstoffkonzentration im Rohgas der Mitbehandlung bei 891 ppm (Bestimmung mit Prüfröhrchen). Der erhöhte Mittelwert im Vergleich zur Online-Messung ist darauf zurückzuführen, dass die Handmessungen nur in den Tagesstunden mit geringem zeitlichen Abstand stattfanden.

In Abbildung 13 sind die Ergebnisse der Messungen im Roh- und Reingas der Mitbehandlung dargestellt.



**Abbildung 13: Darstellung aller mittels Prüfröhrchen gemessener Roh- und Reingaskonzentrationen, die rote Linie markierten den Arbeitsplatzgrenzwert und damit den Zielwert von 5 ppm**

Trotz hoher Rohgaskonzentrationen lagen die Reingaskonzentrationen immer unter dem Arbeitsplatzgrenzwert von 5 ppm. Mit Ausnahme von zwei Werten, welche bei 0,1 ppm lagen, wurde sogar eine Konzentration von 0 ppm Konzentration gemessen.

Bei den vorliegenden Konzentrationen und eingestellten Volumenströmen wurde unabhängig vom Belüfertyp kein Durchbruch gemessen.

Alle Zonen besitzen annähernd die gleiche Luftverteilung über 3 Stränge außer der Zone 0, die eine dichtere Verteilung über 2 Stränge hat. In der Zone 0 wurde festgestellt, dass

- Unter 6 Nm<sup>3</sup>/h es keinen Durchbruch des Schwefelwasserstoffes gab
- bei 6 Nm<sup>3</sup>/h ohne Hauptbelüftung und 800 ppm Schwefelwasserstoff im Rohgas im Reingas 0,1 ppm gemessen wurden (am 12.09)
- bei einer von acht Messungen mit 8 Nm<sup>3</sup>/h mit Hauptbelüftung und 400 ppm Schwefelwasserstoff im Rohgas wurden ebenfalls 0,1 ppm Schwefelwasserstoff Reingas gemessen (am 05.09.)

Es ist anzumerken, dass diese Werte mittels Prüfröhrchen gemessen wurden; 0,1 ppm entspricht ihrer unteren Bestimmungsgrenze. Werte von 0,1 ppm werden vom Odalog nicht sicher erfasst, da der Messbereich der Odalogs bei 1-200 ppm mit einem Fehler von +/-1 ppm liegt.

Folglich war in Zone 0 evtl. der Ansatz zu einem Durchbruch erkennbar. Die Verteilung der Abluft auf ein kleineres Wasservolumen des Belebungsbeckens als bei den anderen Zonen könnte der Grund dafür sein. Der Schwefelwasserstoff konnte sich vermutlich

nicht schnell genug im Wasser lösen. Der Belüftertyp (Silikon in Zone 0) spielt dabei keine Rolle, da auch in der Zone 2 und 3 Silikonbelüfter verwendet wurden, dort aber kein Durchbruch zu messen war. Das Abwasser fließt aus der anaeroben Zone direkt in die Zone 0 des Belebungsbeckens. Im Abwasser der anaeroben Zone ist noch Sulfid enthalten, aus dem wiederum Schwefelwasserstoff entstehen kann. Dies führt zu einem erhöhten Schwefelwasserstoffeintrag in Zone 0 und ist möglicherweise eine Erklärung dafür, dass nur in der Zone 0 ein Minimum an Schwefelwasserstoff im Reingas festgestellt wurde.

Des Weiteren sollten die Unterschiede zwischen den Belüftertypen und Zonen untersucht werden:

3. Gibt es Unterschiede zwischen den beiden Belüftermaterialien?
4. Gibt es Unterschieden zwischen den Zonen?

Dazu wurden folgende Vergleiche angestellt:

- Vergleich der Silikonbelüfter der Zonen 0 und 3 bei jeweils 5,7 Nm<sup>3</sup>/h
- Vergleich der TPU-Belüfter in den Zonen 2 und 3 bei 6,7 und 8 Nm<sup>3</sup>/h
- Vergleichende Druckverlust- und Materialprüfung nach Ausbau der Belüfter

**Tabelle 5: Ergebnisse der Zonen und Belüftermaterialien im Vergleich (die Silikonbelüfter in Zone 0 und 3 konnten nicht an einem Tag verglichen werden, da es zum Ausfall der Anlage kam)**

Datum	Belüftertyp	Zone	Abluftvolumenstrom [Nm <sup>3</sup> /h]	H <sub>2</sub> S-Konzentration [ppm]	
				Rohgas	Reingas
28.08.2013	Silikon	0	5,7	1100	0
05.09.2013	Silikon	3	5,3	500	0
17.09.2013	TPU	2	6,7	800	0
17.09.2013	TPU	3	8	900	0

Es wurde in den Versuchen zu Fragestellung 3 und 4 sowohl bei den Silikon als auch bei den TPU Belüftern in den verschiedenen Zonen kein Schwefelwasserstoff im Reingas gemessen (s. Tabelle 5). Folglich gibt es im Hinblick auf die Reinigungsleistung weder einen Unterschiede zwischen den Zonen noch zwischen den Belüftertypen.

Bei der nach dem Ausbau erfolgten Prüfung durch BWB wurden beide Belüftertypen mit 1-7 m<sup>3</sup>/h bei 1,92 m Wassersäule beaufschlagt und der zugehörige Druckverlust bestimmt. Dazu wurde der Gesamtdruck am Belüfter gemessen und der hydrostatische Druck der Wassersäule subtrahiert. Je länger ein Belüfter in Betrieb gewesen ist, desto höher müsste theoretisch der Druckverlust sein.

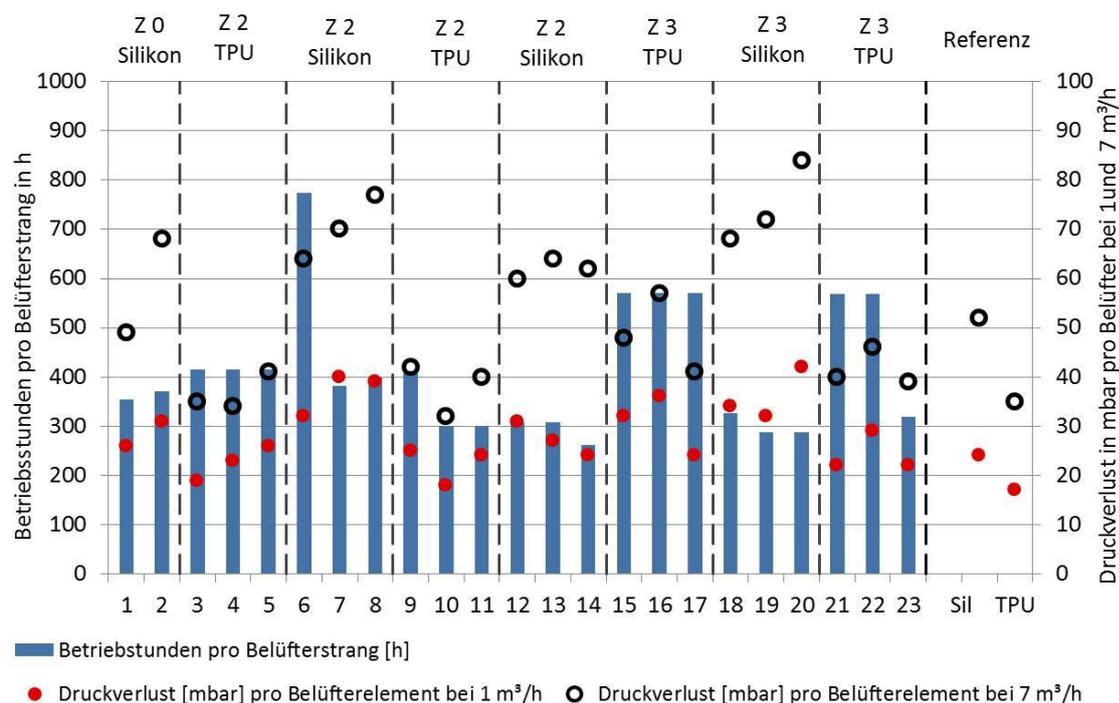
Die Messung wurde für jeweils ein Membranbelüfterelement pro Belüfterstrang durchgeführt. Das getestete Element war bei jedem Belüfterstrang aus der Mitte des Belüfterstranges entnommen worden.

Die ausgebauten Silikonbelüfter wiesen durchgehend höheren Druckverlust als die TPU-Belüfter auf, dies gilt auch für die als Referenz verwendeten neuen Belüfterelemente. Mit Erhöhung der Beaufschlagung erhöhte sich ebenfalls der Unterschied im Druckverlust der beiden Belüftertypen:

Bei einer spezifischen Beaufschlagung von 1 m<sup>3</sup>/h schwankte der Druckverlust der Silikonbelüfter zwischen 26 und 42 mbar (im Mittel 32,5 mbar), der der TPU Belüfter zwischen 19 und 36 mbar (im Mittel 25,0 mbar). Bei einer Beaufschlagung von 7 m<sup>3</sup>/h lagen die Silikonbelüfter bereits bei einem Druckverlust von 49-84 mbar (67,1 mbar im Mittel) der Druckverlust der TPU-Belüfter hingegen nur bei 32-57 mbar (42,5 mbar im Mittel) (s. Abbildung 14). Im Vergleich mit neuen Belüfterelementen (Referenz in Abbildung 14) ist bereits bei beiden Belüfertypen ein Alterungsprozess festzustellen, da die Durchschnittswerte für 1 m<sup>3</sup>/h und 7 m<sup>3</sup>/h spezifische Beaufschlagung (s.o.) über dem jeweiligen Referenzwert liegen.

Für die TPU Belüfter lässt sich auch ein Zusammenhang zwischen Betriebsstunden und Druckverlust bei 7 m<sup>3</sup>/h herstellen. Die TPU Belüfter in Zone 2 haben im Durchschnitt 376 Betriebsstunden und einen durchschnittlichen Druckverlust von 37 mbar. In Zone 3 liegen die durchschnittlichen Betriebsstunden bei 528 Stunden und der durchschnittliche Druckverlust bei 45 mbar.

Für die Silikonbelüfter verhält es sich wider Erwarten umgekehrt. Bei einer höheren durchschnittlichen Betriebsstundenzahl (406 Stunden) weisen die Belüfterelemente in Zone 2 den niedrigeren durchschnittlichen Druckverlust (66 mbar) im Vergleich zu Zone 3 (300 Stunden und 75 mbar) auf. Nicht zu erklären ist, dass das Belüfterelement aus dem Belüfterstrang 6, das mit 773 Stunden, die meisten Betriebsstunden hat (s. Abbildung 14), keinen außergewöhnlich hohen Druckverlust zeigt. Den höchsten Druckverlust hat das getestete Belüfterelement aus dem Belüfterstrang 20, der lediglich 288 Betriebsstunden aufweist. Bei Beaufschlagungen von 1 m<sup>3</sup>/h und 7 m<sup>3</sup>/h lag der mittlere Druckverlust (s.o.) der Silikonbelüfter über den Referenz von 24 mbar und 52 mbar. Die Druckverluste für jedes Belüfterelement bei den unterschiedlichen Volumenströmen, sowie die Testbedingungen, sind dem Anhang D zu entnehmen.

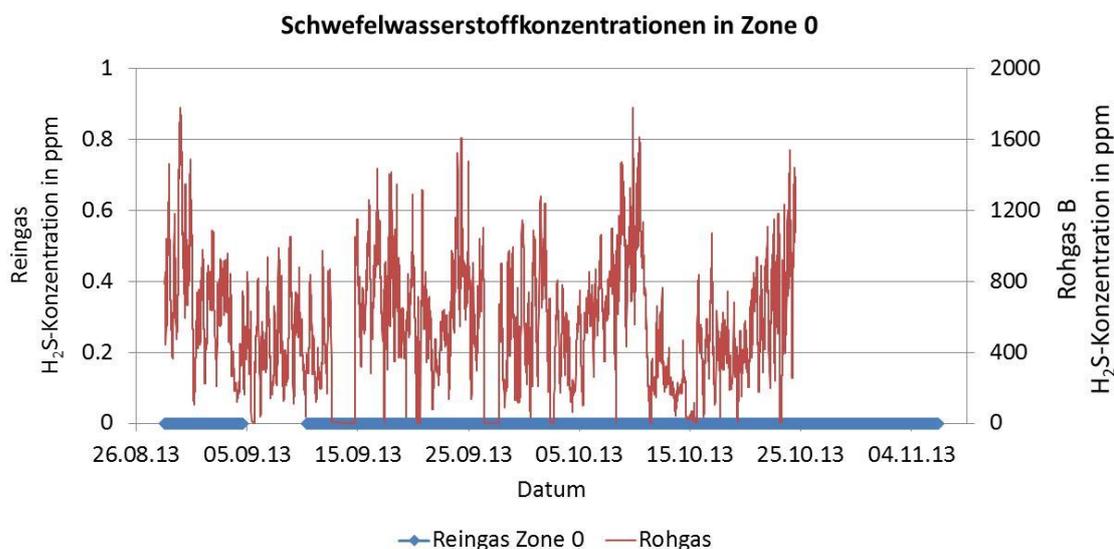


**Abbildung 14: Betriebsstunden der einzelnen Belüfterstränge und Druckverlust pro Belüfter bei einer Beaufschlagung von 1 m<sup>3</sup>/h und 7 m<sup>3</sup>/h, die Belüfterstränge sind von links nach rechts in Gasflussrichtung angeordnet s. Abbildung 7, Z steht für Zone**

Es sollte weiterhin geklärt werden, ob die Verringerung der Schwefelwasserstoffkonzentrationen über einen längeren Zeitraum gewährleistet war:

5. Ist die Verringerung der Emissionen auch über einen längeren Zeitraum stabil?

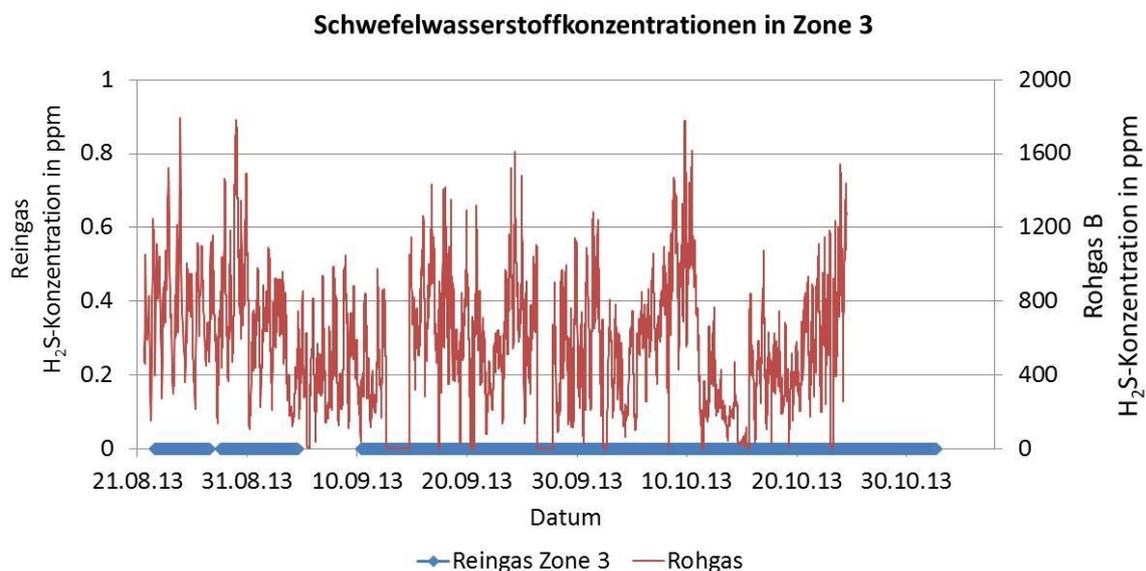
Im Hinblick auf diese Fragestellung wurden Langzeitversuche durchgeführt. Die Belüfter wurden dazu über Nacht und am Wochenende mit 1,8 Nm<sup>3</sup>/h bis 5,7 Nm<sup>3</sup>/h Abluft beaufschlagt.



**Abbildung 15: Mittels Online-Messung aufgezeichnete H<sub>2</sub>S-Konzentration über Zone 0, Unterbrechung der Messwertaufzeichnung aufgrund technischer Schwierigkeiten**

Abbildung 15 ist ein Beispiel für die Ergebnisse der Langzeitversuche. Sie zeigt die Schwefelwasserstoffkonzentrationen, die in Zone 0 mittels Online-Messung über den Versuchszeitraum also auch in der Nacht und am Wochenende aufgezeichnet wurden. In Zone 0 wurde in den Kurzzeitversuchen an zwei Messtagen 0,1 ppm (Handmessung) im Reingas gemessen (s. Abbildung 13). In den Langzeitversuchen in Zone 0 konnte kein Durchbruch des Schwefelwasserstoffes nachgewiesen werden, Werte von 0,1 ppm sind in Abbildung 15 aufgrund des Messbereiches der Odalogs nicht zu erkennen (s.o.). Zur besseren Einordnung der Ergebnisse ist die Schwefelwasserstoffkonzentration der Online-Messung im Rohgas der UV-Anlage mit aufgeführt. Es wurde die Annahme getroffen, dass sich die Schwefelwasserstoffkonzentrationen im Rohgas zur UV-Anlage nicht wesentlich von der im Rohgas, das in die Mitbehandlung eingebracht wurde, unterscheiden.

Auch für andere Zonen bzw. die TPU-Belüfter wurde mittels Online-Messung kein Schwefelwasserstoff im Reingas festgestellt (s. Abbildung 16). Die Onlinedaten der Odalogs sowie eine Aufstellung der Regenerationszeiten etc. sind auf der beiliegenden CD.



**Abbildung 16: Mittels Online-Messung aufgezeichnete H<sub>2</sub>S-Konzentration über der Zone 3, bzw. Zone 2 (21.08. 2013), Unterbrechung der Messwertaufzeichnung aufgrund technischer Schwierigkeiten**

6. Welche Eigenschaften weist das in der Zuleitung und in den Belüfterharken gebildete Kondensat auf?

Für die Materialauswahl der Rohrleitungen etc. wurden die Eigenschaften des gebildeten Kondensates untersucht. Es wurden dazu Kondensatproben in der Zuleitung und in den Belüfterharken genommen und auf die in Kapitel 2.1 aufgeführten Parameter untersucht. Die Beprobung des Kondensates lieferte folgende Werte:

**Tabelle 6: Ergebnisse der Analyse der Kondensatproben, pH- Mittelwert in der Zuleitung N= 5, pH-Mittelwert in den Belüfterharken N=10, Mittelwerte für Sulfat N=5**

		pH-Wert	Sulfat [mg/l]
Zuleitung	Mittelwert	7,1	71
	Minimum	6,9	16
	Maximum	7,3	118
Belüfterharken	Mittelwert	4,5	255
	Minimum	1,5	27
	Maximum	7,2	471

Durch die Umgebungstemperatur wurde die warme, annähernd mit Wasserdampf gesättigt Abluft in der Zuleitung zu den Belüfterharken heruntergekühlt. Mit sinkenden Außentemperaturen kam es folglich zu einem vermehrten Kondensatanfall in der Zuleitung. Es kondensierte mehr Wasserdampf in der Zuleitung als in den Belüfterharken aus. Folglich war der Wasseranteil im Kondensat der Zuleitung im Vergleich zu dem in den Belüfterharken größer. Das Kondensat in den Belüfterharken war daher konzentrierter als das in der Zuleitung.

Ein Teil des Schwefelwasserstoffes wurde im Kondensat der Zuleitung und den Belüfterharken gelöst und führte durch die Bildung von schwefeliger Säure und Schwefelsäure zu einem Absinken des pH-Wertes (minimaler Wert bei 1,5 in den Belüfterharken). Der pH-Wert der Kondensatproben mit 4 bis 6 wöchiger Standzeit lag zwischen 3 und 4. Es gibt daher keinen Hinweis darauf, dass es durch die lange Standzeit zu vermehrter biogener Schwefelsäurebildung kam.

Für die Materialauswahl bei einer großtechnischen Umsetzung des Vorversuches sind der minimal gemessene pH-Wert von 1,5 sowie die maximale Sulfatkonzentration von 471 mg/l zu berücksichtigen. Die vollständige Kondensatanalyse ist dem Anhang E zu entnehmen.

7. Wird die Geruchsstoff-Konzentration unter den Grenzwert von 500 GE/m<sup>3</sup> gesenkt?

Die Frage des Geruchs wurde auch betrachtet. Geruch korreliert nicht unbedingt mit der Schwefelwasserstoffkonzentration, ist jedoch ein wichtiger Parameter für die Umgebung der Kläranlage. Um die Geruchsstoff-Konzentration (GK) zu messen, wurden an drei Tagen olfaktometrische Messungen im Roh- und Reingas bei verschiedenen Volumenströmen, Belüftertypen und Zonen durchgeführt.

Bei jeder Messung wurden an den Messstellen jeweils zwei Proben a 30 Minuten nacheinander gezogen (Doppelbestimmung).

Der Probenahme mit Abluft wurde jeweils eine Probenahme ohne Abluft (nur mit Hauptbelüftung) vorgeschaltet, um den Eigengeruch des Beckens zu ermitteln (Referenzprobe). Während der Probenahme mit Abluft wurde die Hauptbelüftung abgeschaltet, um eine Verdünnung der Probe auszuschließen.

In der TA -Luft (technische Anleitung zur Luftreinhaltung, Verwaltungsvorschrift aus dem Bundesimmissionsschutzgesetz) ist für technische Abluftbehandlungsanlagen ein Grenzwert der Geruchsstoff-Konzentration von 500 GE/m<sup>3</sup> festgelegt. Es wurde geprüft, ob die Geruchsstoff-Konzentration in der Mitbehandlung unter diesen Grenzwert reduziert werden konnte.

**Tabelle 7: Ergebnisse der olfaktometrischen Messungen, alle Werte als geometrische Mittelwerte der Doppelbestimmung angegeben, GK (Geruchsstoff-Konzentration in [GE/m<sup>3</sup>])**

Zone	Datum	Rohgas		Reingas		Referenz		Abluft in Nm <sup>3</sup> /h	Belüftertyp
		GK [GE/m <sup>3</sup> ]	H <sub>2</sub> S [ppm]	GK [GE/m <sup>3</sup> ]	H <sub>2</sub> S [ppm]	GK [GE/m <sup>3</sup> ]	H <sub>2</sub> S [ppm]		
0	12.09.2013	56.724	894	418	0	39	0	6	Silikon
0	24.09.2013	160.439	1100	322	0	352	0	8	Silikon
2	05.09.2013	73.562	447	88	0	28	0	5	Silikon
3	05.09.2013	73.562	447	37	0	18	0	5,3	Silikon
3	12.09.2013	56.724	894	45	0	17	0	8	TPU

Tabelle 7 zeigt die Geruchsstoff-Konzentrationen im Roh- und Reingas nach Zonen sortiert. Trotz hoher Rohgaswerte (zwischen 56.724 und 160.439 GE/m<sup>3</sup>) wurden im Reingas keine Werte über 500 GE/m<sup>3</sup> gemessen (Einzelwerte s. Anhang G). An zwei Versuchstagen wurden Messungen in Zone 0 durchgeführt (12.09. und 24.09.). Bei der ersten Messung in Zone 0 war der Wert mit 418 GE/m<sup>3</sup> (Mittelwert der Doppelbestimmung) im Vergleich zur Referenzprobe mit 39 GE/m<sup>3</sup> erhöht. Auch verglichen mit Zone 3 (Mittelwert von 45 GE/m<sup>3</sup>) und trotz einer Messunsicherheit von 50% war der Wert in Zone 0 deutlich erhöht. Bei der ersten Messung sank der Sauerstoffgehalt in Zone 0 nach dem

Abschalten der Hauptbelüftung unter 0,5 mg/l. Die Zone 0 wird im regulären Betrieb mit 1000 Nm<sup>3</sup>/h bis 2000 Nm<sup>3</sup>/h bei einem Sauerstoffsollwert von 2-4 mg/l belüftet. Während der Messung am ersten Versuchstag wurde nur Abluft eingeleitet, die Zone erhielt lediglich 180 Nm<sup>3</sup>/h. Sie war daher unterbelüftet, was zu einem veränderten Geruch führen kann. Die Messung wurde daher wiederholt und die Hauptbelüftung nicht vollständig abgeschaltet, sondern so geregelt, dass der Sauerstoffgehalt über 0,5 mg/l und die Zone damit aerob blieb.

Der Grenzwert von 500 GE/m<sup>3</sup> wurde bei keiner der Messungen überschritten. Dabei wurde die Messunsicherheit von 50% nicht beachtet. Der Geruch ist bei den Versuchen der Mitbehandlung so vermindert, dass der Grenzwert der TA-Luft eingehalten werden kann.

#### 8. Hat die Abluft Einfluss auf die Biozönose?

Die Reduktion der Schwefelwasserstoffkonzentration darf auf keinen Fall die Reinigung des Abwassers in der biologischen Stufe beeinträchtigen. Bei der Behandlung der Abluft in der Mitbehandlung stellt sich die Frage, ob der eingebrachte Schwefelwasserstoff die Mikroorganismen im Belebtschlamm und damit die Schlammstruktur des Beckens negativ beeinflusst hat.

Dazu wurde alle zwei Wochen eine Probe aus dem Ablauf des Beckens 3.2 und eine aus dem Ablauf eines Nachbarbeckens als Referenz analysiert. Es wurden folgende Parameter bestimmt:

- Schlammvolumenindex (ISV)
- Trockensubstanz (TR)
- Katalase
- Nitrifikanten
- Fädigkeit

Schlammvolumenindex, Trockensubstanz und Fädigkeit geben Aufschluss über die Schlammstruktur. Nach der biologischen Stufe muss der Schlamm vom Wasser getrennt werden. Dies geschieht in den Nachklärbecken. Je mehr Fadenbakterien im Schlamm vorhanden sind, desto schlechter ist das Absetzverhalten. Für die Charakterisierung des Absetzverhaltens wird der Schlammvolumenindex herangezogen. Je höher dieser ist, desto schlechter ist das Absetzverhalten. Mit sinkender Umgebungstemperatur erhöht sich der Anteil der Fadenbakterien im Schlamm des Belebungsbeckens. Der Schlammvolumenindex im Belebungsbecken unterliegt daher jahreszeitlichen Schwankungen, die durch regelmäßige Untersuchungen erfasst werden. Der über die Versuchsdauer ermittelte Schlammvolumenindex wurde mit dem Schlammvolumenindex verglichen, der in den letzten sechs Monaten in den anderen Belebungsbecken ermittelt wurde.

Für die Aktivität der vorhandenen Mikroorganismen ist die Katalasemenge im Schlamm ein wesentlicher Indikator. Die Stickstoffentfernung in der biologischen Stufe kann nur durch nitrifizierenden, sowie denitrifizierende Bakterien gewährleistet werden. Daher ist die Bestimmung der Nitrifikanten ein Anhaltspunkt für die Reinigungsleistung der biologischen Stufe.

In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der Untersuchung der Biozönose des Schlammes aus Becken 3.2 und des Referenzbeckens (4.1 oder 4.2) dargestellt. Die Referenzbecken wurden mit demselben Abwasser beschickt. Die Belegung im jeweiligen Referenzbecken war damit der gleichen Belastung ausgesetzt.

**Tabelle 8: Ergebnisse für Trockensubstanz und Katalase des Rücklaufschlammes (Biozönose) aus dem Becken 3.2 und im Vergleich aus einem Referenzbecken (4.1 oder 4.2)**

Datum	Trockensubstanz [g/l]		Katalase [g H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /g oTS min]	
			<0,150 geringe Stoffwechselaktivität >= 0,150 gute Stoffwechselaktivität	
Becken	3.2	Referenzbecken	3.2	Referenzbecken
27.08.2013	3,1	4,1	0,205	0,176
10.09.2013	3,7	3,2	0,192	0,209
24.09.2013	3,7	3,8	0,198	0,184
08.10.2013	4,7	4,0	0,196	0,176
23.10.2013	3,8	3,5	0,214	0,216
06.11.2013	3,6	3,7	0,208	0,204

Bei der Trockensubstanz und Katalase sind keine Unterschiede zwischen den Becken mit und ohne Abluft erkennbar (s. Tabelle 8). Im Schlammvolumenindex hingegen lässt sich ein leicht verstärkter Anstieg über den Versuchszeitraum in Becken 3.2 beobachten (s. Tabelle 6)

**Tabelle 9: Schlammvolumenindex des Belebungsbeckens 3.2 und eines Referenzbeckens über den Versuchszeitraum**

Datum	Schlammvolumenindex [ml/g]	
	<100 Normalbereich 100-150 mäßige Eindickung >150 Blähschlamm	
Becken	3.2	Referenzbecken
27.08.2013	55	48
10.09.2013	54	47
24.09.2013	57	50
08.10.2013	64	53
23.10.2013	64	54
06.11.2013	72	57

In Tabelle 10 sind die Schlammvolumenindexwerte des Vorjahres des Beckens 3.2 dargestellt. Anhand der Daten lässt sich erkennen, dass der Anstieg des Schlammvolumenindexes bei vergleichbaren Temperaturen (durchschnittliche Temperatur im November 2012: 6,0 °C, im November 2013: 5,7°C, deutscher Wetterdienst, Wetterstation Tegel) zwar früher einsetzt, aber nicht stärker ausgeprägt ist.

Tabelle 10: Schlammindex des Vorjahres des Beckens 3.2

Datum	ISV [ml/g]
<b>Becken 3.2</b>	
08.08.2012	56
14.08.2012	56
16.08.2012	56
24.08.2012	54
07.09.2012	50
13.09.2012	54
21.09.2012	49
25.09.2012	51
25.09.2012	48
09.10.2012	56
11.10.2012	55
19.10.2012	53
25.10.2012	56
01.11.2012	58
06.11.2012	54
12.11.2012	65
20.11.2012	71
28.11.2012	73
30.11.2012	71

Bei der Betrachtung des Schlammvolumenindexes der anderen Belebungsbecken über die letzten sechs Monate desselben Jahres (s. Abbildung 17) wird deutlich, dass der Schlammvolumenindex der letzten Untersuchung im Becken 3.2 mit 72 ml/g noch im oberen Bereich der normalen Schwankungsbreite liegt. In der folgenden Untersuchung der Referenzbecken ist der Schlammvolumenindex sogar noch stärker erhöht (81 ml/g, s. Abbildung 17).

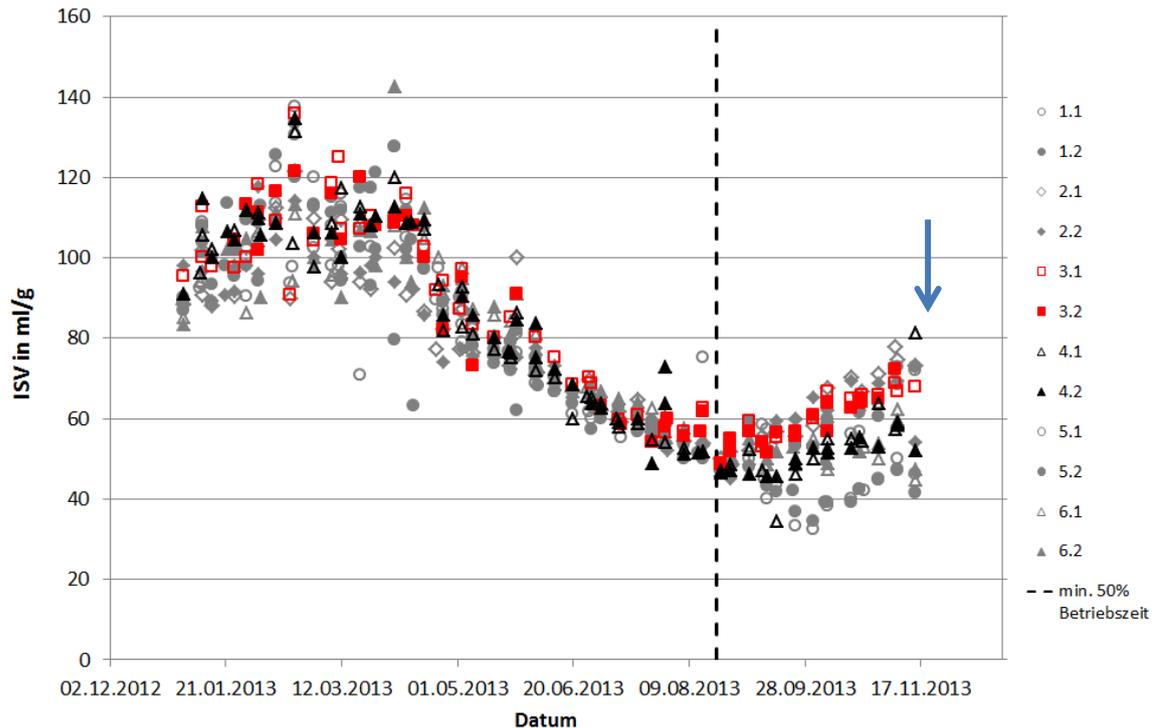


Abbildung 17: Schlammvolumenindex der Belebungsbecken eins bis sechs über die letzten sechs Monate, Becken 3.1 und 3.2 in rot, da der Belebtschlamm von Versuchsbeginn an mit Abluft in Kontakt gekommen ist, der Wert der letzten Referenzmessung ist mit einem Pfeil markiert

Die Analyse des Schlammes des Beckens 3.2 ergab im Vergleich mit denen des Beckens 4.1 bzw. 4.2 in die keine Abluft eingebracht wurde, dass bei einem Abluftvolumenstrom von  $240 \text{ Nm}^3/\text{h}$  keine Auffälligkeiten zu beobachten waren. Auch bei den Parametern Fädigkeit und Nitrifikanten wurden keine Unterschiede zu den Referenzbecken festgestellt, die vollständige Analyse ist dem Anhang F zu entnehmen. Die Daten der anderen Linien, sowie die Analytik aus 2012 sind auf der CD hinterlegt. Abluftmengen bis  $240 \text{ Nm}^3/\text{h}$  haben nach den Versuchsergebnissen keine negativen Auswirkungen auf die Biologie des Belebungsbeckens.

9. Bis zu welchem Grad kann die Hauptbelüftung durch Abluft ersetzt werden? (Substitution)

In Bezug auf die Betriebskosten stellt sich die Frage, in wie weit die Hauptbelüftung durch die Abluft ersetzt werden kann. Da während dieser Versuche der Sauerstoffgehalt im Belebungsbecken gemessen wurde, sollte gleichzeitig überprüft werden, ob die in der biologischen Stufe der KA verwendeten elektrochemischen Sonden eine Querempfindlichkeit zu Schwefelwasserstoff aufweisen.

- Um das Substitutionspotential abzuschätzen, wurde der Sauerstoffgehalt im Rohgas gemessen und drei verschiedene Arten von Substitutionsversuchen durchgeführt:
  1. phasenweise Substitution
  2. direkte Substitution
  3. Dauersubstitution

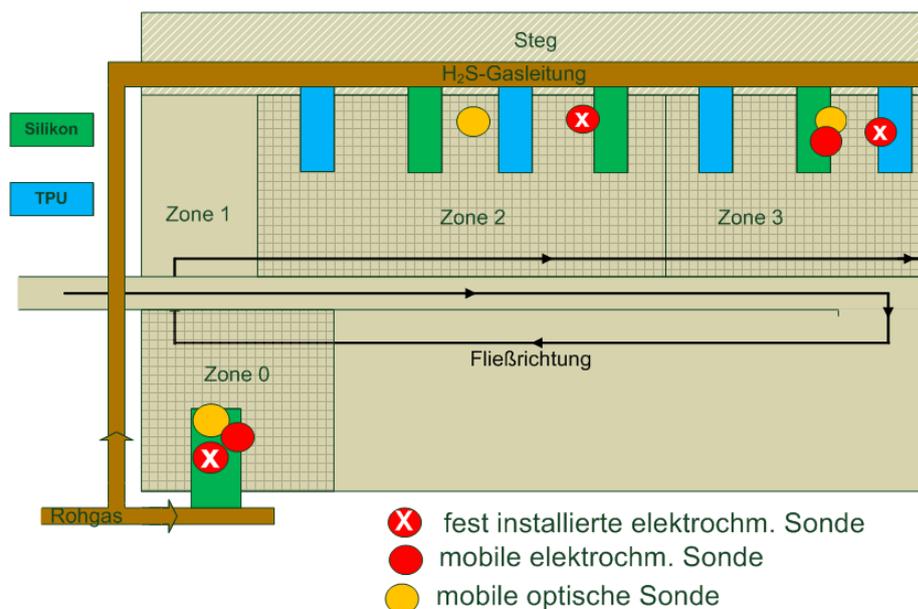
Der Sauerstoffgehalt in der Abluft lag bei 19-21% und damit leicht unter dem Luftsauerstoffgehalt der Hauptbelüftung. Die Substitution der Hauptbelüftung wäre demnach zwar nicht vollständig, aber theoretisch zu einem hohen Prozentsatz möglich.

Der Volumenstrom der Hauptbelüftung wurde im Versuchsablauf der Substitutionsversuche nicht geregelt und konnte nicht durchgehend auf dem eingestellten Volumenstrom konstant gehalten werden. Schwankungen in der Qualität und Menge des Zulaufs führten aufgrund des unregelmäßigen Volumenstromes zu unerwünschten starken Schwankungen in der Sauerstoffkonzentration. In Zone 0 sind die Auswirkungen der Zulaufschwankungen auf die Sauerstoffzehrung am größten. Nach Fehlversuchen in Zone 0 wurden die Versuche der phasenweisen Substitution nur noch in Zone 2 und 3 durchgeführt, da dort die Schwankungen in der Zulaufmenge und organischen Belastung geringer sind. Die Versuche der direkten Substitution wurden in Zone 0 und 3 realisiert, da bei diesem Versuchsablauf Zulaufschwankungen weniger starke Auswirkungen haben. Die Zone 3 erwies sich während der Versuche aufgrund der schlechteren Verteilung der Abluft als weniger geeignet. Der Sauerstoffgehalt blieb auch nach Einleiten der Abluft niedrig (s. Abbildung 20 und Abbildung 21). Zone 0 ist die räumlich kleinste Zone, in der der Einfluss der Verteilung der Abluft am geringsten ist. Außerdem konnte die Hauptbelüftung im Bereich der Rohgas-Belüfter über eine Handklappe verringert werden. Versuchsart, Zone und Anzahl der Versuche sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

**Tabelle 11: Anzahl der Substitutionsversuche in den verschiedenen Zonen**

Versuchsart	Zone 0	Zone 2	Zone 3
Phasenweise S.	2	2	4
Direkte S.	3	0	2
Dauersubstitution	In allen Zonen über mehrere Tage durchgeführt		

Die Lage der Sonden im Belebungsbecken ist der Abbildung 18 zu entnehmen. Der Sauerstoffgehalt im Becken verteilt sich mit der Strömung und damit in Fließrichtung. Die Lage der fest installierten Sauerstoffmessung in der Zone 3 des Belebungsbeckens war ungünstig, da sie sich in Strömungsrichtung sowohl von den TPU- als auch von den Silikon-Rohgasbelüftern zu weit entfernt befand. Zudem sollte gleichzeitig eine überprüft werden, ob eine Querempfindlichkeit der elektrochemischen Sonden zu Schwefelwasserstoff besteht. Es wurde auf eine mobile Sonde zurückgegriffen. Diese wurde für die Versuche mit ca. 10 cm Abstand neben der optischen Sonde platziert.



**Abbildung 18: Lage der verschiedenen Sondentypen, die fest installierte elektrochemische Sonde zeigte bis zu ihrer Kalibrierung am 21.10.2013 starke Messungenauigkeiten; es wurde bis zur Kalibrierung eine mobile elektrochemische oder optische Sonde verwendet**

- Versuchsablauf bei der phasenweisen Substitution (s. Abbildung 19):
1. Der Volumenstrom der Hauptbelüftung wurde manuell geregelt und nach Möglichkeit konstant gehalten
  2. Die Hauptbelüftung wurde um den im nächsten Schritt eingeleiteten Abluftvolumenstrom (i.d.R. 240 Nm<sup>3</sup>/h) reduziert
  3. Die Abluft wurde eingeleitet
  - 4.-8. Die Abluft wurde im Wechsel eingeleitet und nicht eingeleitet

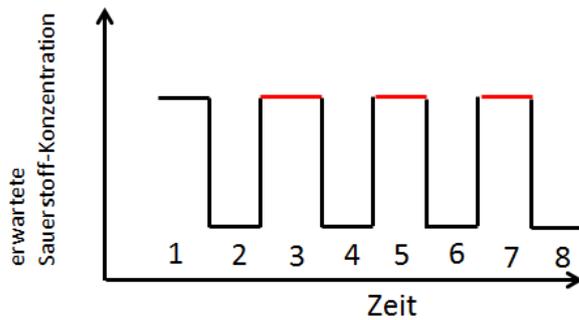


Abbildung 19: theoretischer Verlauf der Sauerstoffkonzentration bei 100% Substitution, schwarze Linie: nur Hauptbelüftung, rote Linie: Abluft und reduzierte Hauptbelüftung

Im Folgenden sind die Ergebnisse der phasenweisen Substitution dargestellt. Die Abbildungen zeigen die Verläufe der Sauerstoffkonzentration, sowie die des Volumenstromes von Abluft und Hauptbelüftung. Aufgrund der geringen Hauptbelüftung wurde im ersten abgebildeten Versuch (s. Abbildung 20) die Hauptbelüftung nur um 140 Nm<sup>3</sup>/h reduziert. Trotzdem wurden 240 Nm<sup>3</sup>/h Abluft eingebracht. Die Einbringung der Abluft erfolgte bei den zuerst dargestellten Versuchen in Abbildung 20 und Abbildung 21 über drei, beiden im Folgenden gezeigten Versuchen über sechs Belüfterstränge (Abbildung 22 und Abbildung 23).

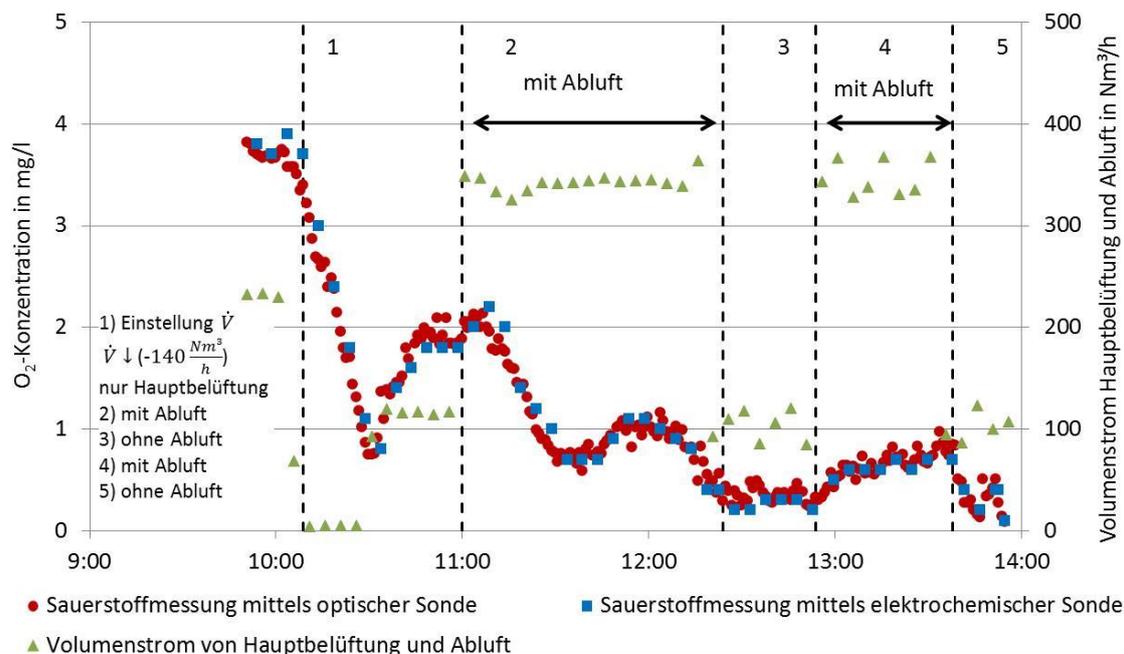
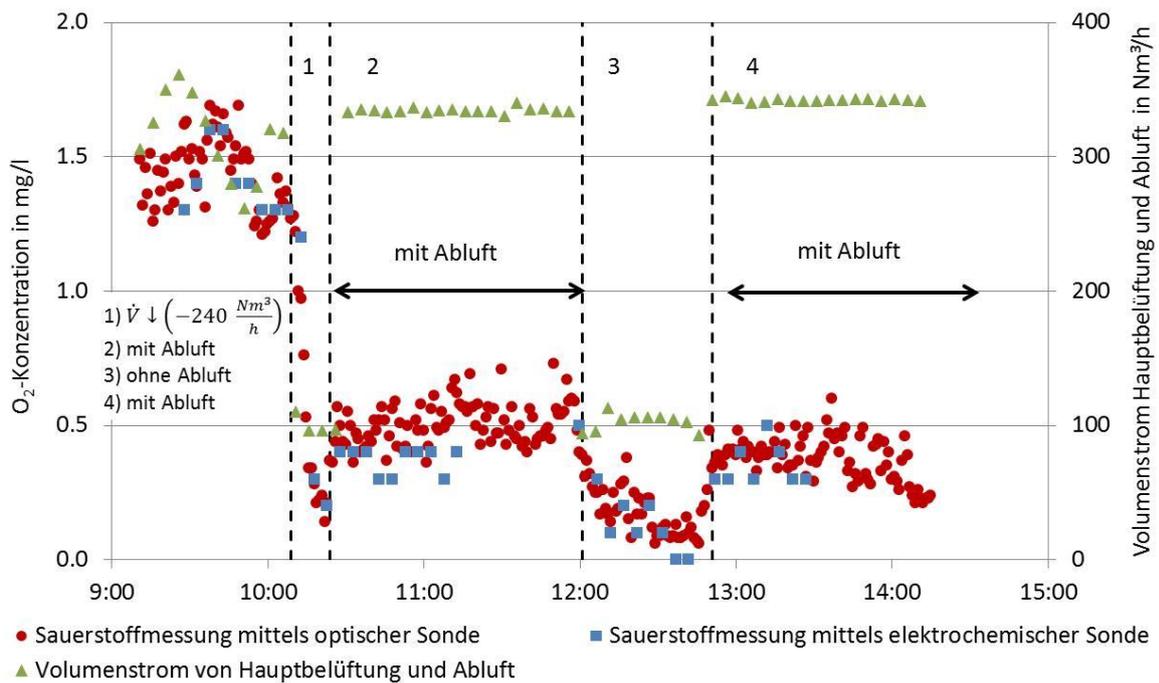
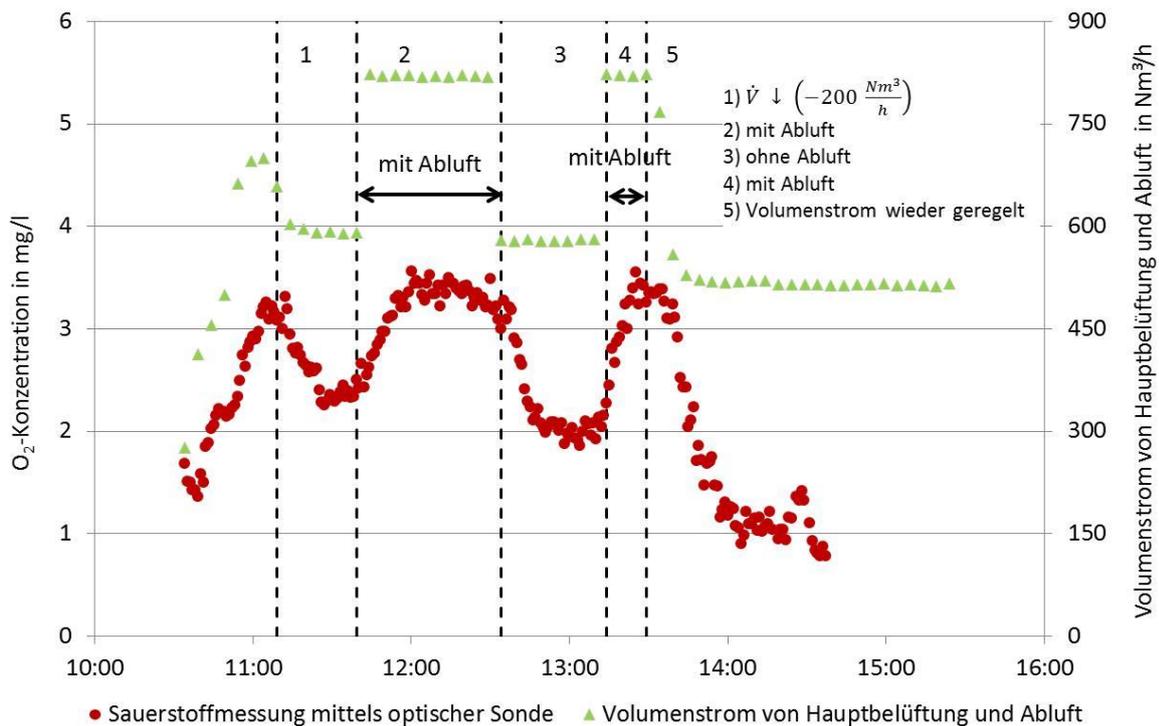


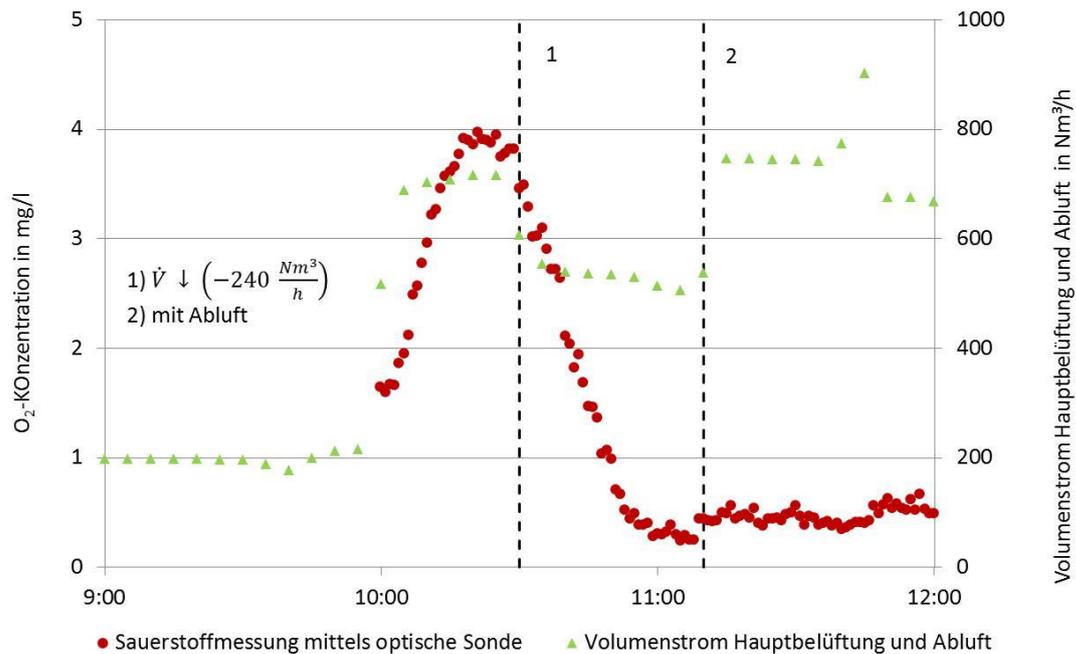
Abbildung 20: Versuch phasenweise Substitution in Zone 3 mit Silikonbelüftern und 240 Nm<sup>3</sup>/h Abluft auf drei Belüfterstränge verteilt, Messintervalle: minütliche Messung der optischen Sonde, alle 5 Minuten manuelle Messwertaufnahme an der elektrochemischen Sonde



**Abbildung 21:** Wiederholungsversuch phasenweise Substitution in Zone 3 mit Silikonbelüftern und 240 Nm<sup>3</sup>/h Abluft auf drei Belüfterstränge verteilt, Messintervalle: minutliche Messung der optischen Sonde, alle 5 Minuten manuelle Messwertaufnahme an der elektrochemischen Sonde



**Abbildung 22:** phasenweise Substitution mit großflächigerer Verteilung der Abluft auf sechs Belüfterstränge in Zone 2



**Abbildung 23: Wiederholungsversuch phasenweise Substitution mit großflächigerer Verteilung der Abluft auf sechs Belüfterstränge in Zone 2**

Aus den Versuchen der phasenweisen Substitution geht hervor, dass der Substitutionsgrad im Wesentlichen von drei Faktoren abhängt:

- Verteilung der Abluft im Belebungsbecken
- Anteil der Abluft an der Hauptbelüftung
- Schwankungen in der Zulaufmenge und organischen Belastung

Je großflächiger die Abluft ins Belebungsbecken eingebracht wird, desto besser ist der Substitutionsgrad (vgl. Abbildung 21 und Abbildung 22)

Der Einfluss der Verteilung hängt davon ab, welchen Anteil die Abluft an der Gesamtbelüftung hat. Ist der Anteil der Abluft an der Hauptbelüftung hoch, die eingebrachte Abluft jedoch nicht optimal verteilt, ist der erreichbare Substitutionsgrad gering. Bei einem niedrigen Abluftanteil hatte eine suboptimale Verteilung weniger Einfluss. Während der Versuche bei denen die Abluft bei niedrigem Hauptbelüftungsniveau (200-300 Nm<sup>3</sup>/h) und einem Sauerstoffgehalt von ca. 1,5 mg/L über drei Belüfterstränge eingebracht wurde (s. Abbildung 20 und Abbildung 21) stieg der Sauerstoffgehalt durch das Einleiten der Abluft um lediglich ca. 0,5 mg/L. Wurde das Niveau der Hauptbelüftung von ca. 200 Nm<sup>3</sup>/h auf ca. 700 Nm<sup>3</sup>/h und damit der Sauerstoffgehalt zu Versuchsbeginn auf 3 mg/L angehoben und die Abluft auf sechs Belüfterstränge verteilt, konnte in einem Versuch die Ausgangsauerstoffkonzentration wieder erreicht werden (s. Abbildung 22). Einschränkend ist anzumerken, dass der Volumenstrom von Abluft und Hauptbelüftung wegen regelungstechnischer Schwierigkeiten ca. 20% über dem Ausgangsvolumenstrom lag. Der Versuchsverlauf war bedingt durch die schwankende Zulaufqualität und -menge nicht wiederholbar (s. Abbildung 23). Die Sauerstoffzehrung ist stark von der Zulaufqualität abhängig. Erhöhte sich während des Versuches der Sauerstoffbedarf, sank der Sauerstoffgehalt unabhängig von Substitutionsgrad, der mit der Abluft erreicht werden kann ab, da der Volumenstrom im Versuch nicht geregelt wurde (s. Abbildung 20 und Abbildung 23).

Daraufhin wurde ein weiterer Ansatz gewählt, um die Auswirkungen der Zulaufschwankungen zu minimieren, die direkte Substitution.

- Versuchsablauf bei der direkten Substitution:
  1. Der Volumenstrom der Hauptbelüftung wird manuell geregelt und nach Möglichkeit konstant gehalten
  2. Die Hauptbelüftung wird um den Volumenstrom der gleichzeitig eingeleiteten Abluft (i.d.R. 240 Nm<sup>3</sup>/h) reduziert
  3. Die Hauptbelüftung wird wieder auf den ursprünglichen Wert erhöht und die Abluft weggenommen
  4. Die Hauptbelüftung um den Volumenstrom der gleichzeitig eingeleiteten Abluft (i.d.R. 240 Nm<sup>3</sup>/h) reduziert (s. Abbildung 24, Schritt 2)
  5. Die Hauptbelüftung wird wieder erhöht und keine Abluft mehr eingeleitet (s. Abbildung 24, Schritt 3)

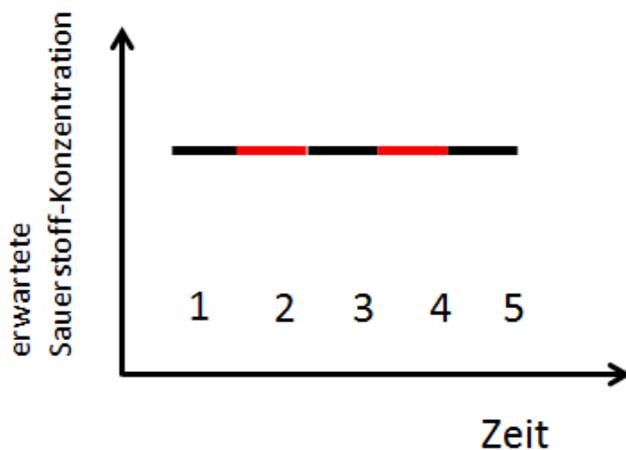


Abbildung 24: Verlauf der Sauerstoffkonzentration bei direkter Substitution bei Zuschalten der Abluft im Wechsel mit der Reduktion der Hauptbelüftung, schwarze Linie: nur Hauptbelüftung, rote Linie: Abluft und reduzierte Hauptbelüftung

In Abbildung 25 ist der Versuchsverlauf der direkten Substitution in Zone 0 dargestellt. Die zwei in Zone 0 durchgeführten Versuche (zweiter Versuch ist aufgrund eines ähnlichen Verlaufs nicht dargestellt) zeigen, dass die Sauerstoffkonzentration über die Versuchsdauer annähernd konstant bleibt. Nur leichte Änderungen im Sauerstoffgehalt wurden festgestellt, bedingt durch den Einfluss der Zulaufmenge und der organischen Belastung, der auch nicht vollständig ausgeschlossen werden konnte. Im Hinblick auf das Verhältnis von Hauptbelüftung und Abluft muss einschränkend festgestellt werden, dass von ca. 2000 Nm<sup>3</sup>/h Hauptbelüftung nur 240 Nm<sup>3</sup>/h durch Abluft d.h. max. 12% der Hauptbelüftung durch Abluft ersetzt werden konnten.

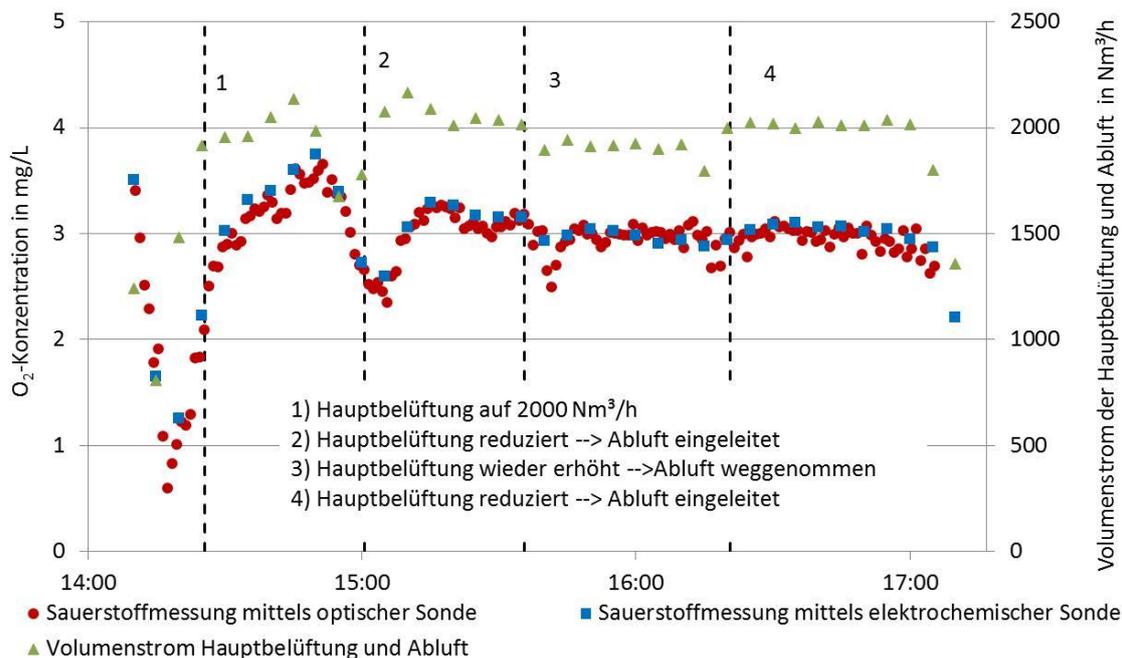
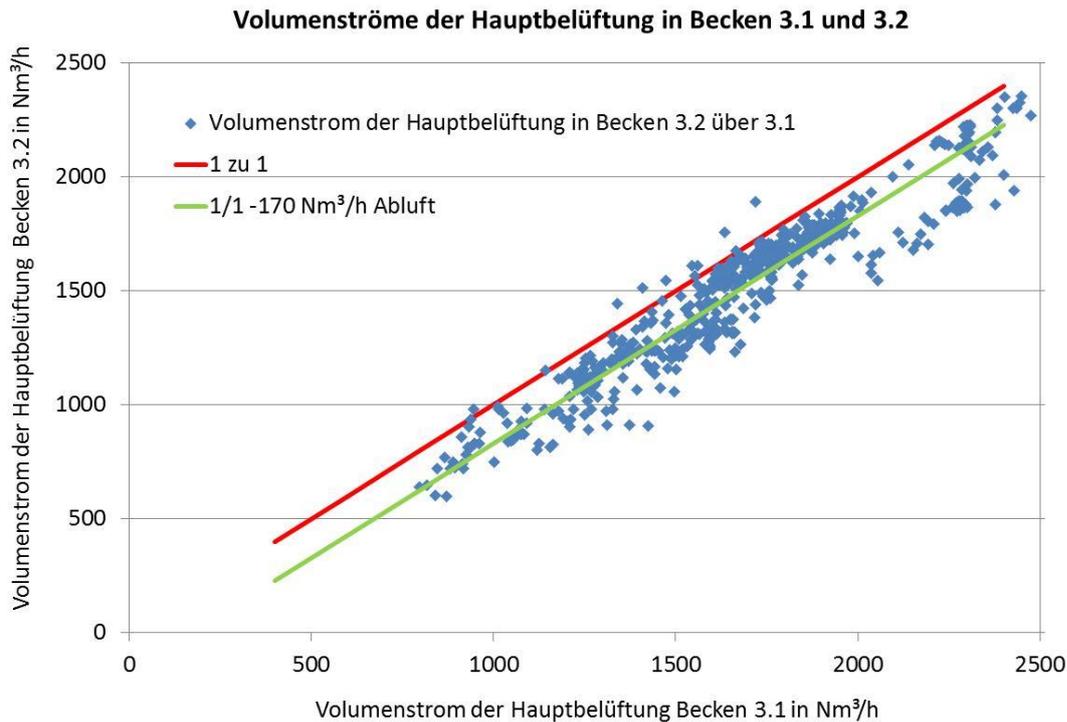


Abbildung 25: Versuchsverlauf nach dem Ansatz der direkten Substitution in Zone 0

- Dauersubstitution:
  - Vergleich der der Volumenströme der Hauptbelüftung in den einzelnen Zonen der Becken 3.1 (ohne Abluft) und 3.2 (mit Abluft) bei automatischer Regelung der Sauerstoffkonzentration und identischen Sauerstoffsollwerten
  - Durch die automatische Regelung werden Zulaufschwankungen berücksichtigt
  - Erwartung: geringerer Volumenstrom der Hauptbelüftung im Becken 3.2 aufgrund der eingeleiteten Abluft

Ergänzend wurde noch die Hauptbelüftung der Zonen 0-3 in den Becken 3.1 (ohne Abluft) und Becken 3.2 (mit Abluft) während der Langzeitversuche verglichen. Allerdings sind die Werte aus den Zonen 2 und 3 nur eingeschränkt verwertbar, da bereits vor Beginn der Versuch der Luftertrag in das Becken 3.2 geringer war als in das Becken 3.1. Es werden im Folgenden die Ergebnisse der Zone 0 aufgeführt. Abbildung 26 zeigt den Volumenstrom der Hauptbelüftung, der in das Becken 3.2 eingebracht wurde, über dem des Beckens 3.1 aufgetragen. Es wurden 170 Nm<sup>3</sup>/h Abluft vom 01.-03.11.2013 in die Zone 0 eingebracht. Das entspricht einer spezifischen Beaufschlagung von 5,7 Nm<sup>3</sup>/h. Die gesamte verfügbare Abluftmenge von 240 Nm<sup>3</sup>/h konnten aufgrund der maximalen dauerhaften Beaufschlagung der Belüfter von 6 Nm<sup>3</sup>/h nicht realisiert werden. Die rote Linie bildet den Kurvenverlauf bei gleichen Volumenströmen der Hauptbelüftung ab, die grüne Linie den bei 170 Nm<sup>3</sup>/h weniger Hauptbelüftung im Becken 3.2. Die Ergebnisse zeigen, der Volumenstrom in das Becken 3.2 geringer als der Volumenstrom in das Becken 3.1 ist. Die Differenz liegt im Mittel bei 164 Nm<sup>3</sup>/h



**Abbildung 26: Dauersubstitutionsversuch in Zone 0 vom 01.-03.11.2013 mit 170 Nm<sup>3</sup>/h, rote Linie (1 zu 1): gleiche Volumenströme der Hauptbelüftung in beiden Becken, grüne Linie (1/1-170 Nm<sup>3</sup>/h Abluft): 170 Nm<sup>3</sup>/h weniger Hauptbelüftung in Becken 3.2**

Die Substitution der Hauptbelüftung durch Abluft scheint nach den bisherigen Ergebnissen in nennenswertem Umfang möglich zu sein.

Es kann anhand der Versuche keine Aussage darüber getroffen werden, bis zu welchem Grad, die eingebrachte Abluftmenge die Hauptbelüftung ersetzen kann, da die Abluftmenge im Vergleich zur Hauptbelüftung sehr gering ist (ca. 5% bezogen auf die gesamte Luftmenge, die in das Becken 3.2 im Durchschnitt vom 28.10.-03.11.2013 regulär eingebracht wurde) und nicht gleichmäßig verteilt eingebracht werden konnte.

Die Daten aller Substitutionsversuche sind auf der beiliegenden CD.

10. Zeigen die im Belebungsbecken installierten elektrochemischen Sauerstoffsonden eine Querempfindlichkeit zu Schwefelwasserstoff, die in dem Messprinzip begründet ist?

In vorherigen Untersuchungen gab es Hinweise auf eine Querempfindlichkeit von elektrochemischen Sauerstoffsonden zu Schwefelwasserstoff. Im Belebungsbecken der Kläranlage werden für die Sauerstoffmessung elektrochemische Sonden verwendet. Es wurde im Rahmen der Substitutionsversuche die Sauerstoffmessung mit einer optischen und einer elektrochemischen Sonde durchgeführt, um auszuschließen, dass die eingebrachte Abluft den mit der elektrochemischen Sonde gemessenen Sauerstoffgehalt beeinflusst.

Die Ergebnisse in Abbildung 27 zeigen die Sauerstoffkonzentrationen, die mit den verschiedenen Messverfahren (optisch und elektrochemisch) aufgenommen wurden.

Die mit den beiden Verfahren gemessenen Sauerstoffkonzentrationen waren in allen Versuchen sowohl mit als auch ohne Abluft nahezu identisch. Die Versuche gaben keinen Hinweis auf eine Querempfindlichkeit der elektrochemischen Sonden.

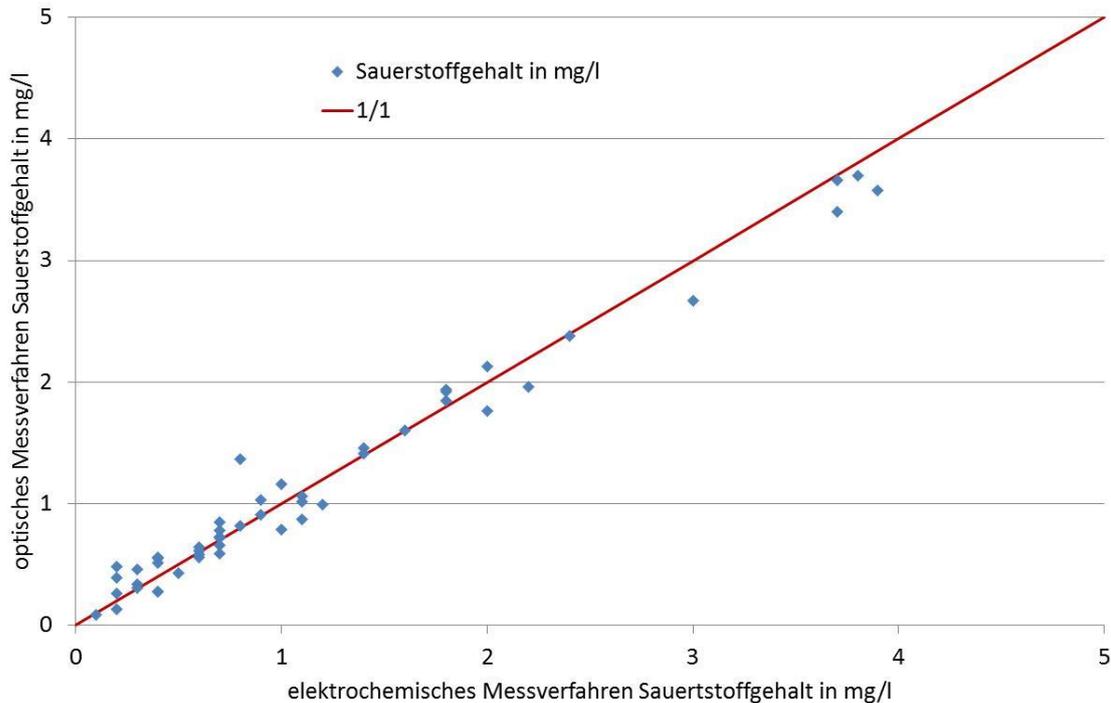


Abbildung 27: Optische und elektrochemische Messung des Sauerstoffgehaltes

#### 4.4 Materialprüfung

Im Rahmen der Vorversuch sollte ebenfalls untersucht werden ob bzw. inwiefern sich die Beschickung der Belüfterelemente mit schwefelwasserstoffhaltiger Abluft auf die verwendeten Membranmaterialien (Silikon und TPU) auswirkt.

Dazu wurden nach der Außerbetriebnahme der Anlage jeweils drei Belüfterelemente eines Typs von der Firma „KIWA MPA“ entsprechend der DIN 30692-2 geprüft und mit einer unbeanspruchten Membran (Referenz) verglichen (s. Bericht der KIWA-MPA Nr. 13/793901).

Von den im Versuch verwendeten Silikonmembranen wurde jeweils ein Belüfterelemente der aus der Mitte der Stränge 7,8,20, von den TPU-Membranen ebenfalls ein Belüfterelemente aus der Mitte der Stränge 15,16 und 22 für die Prüfung ausgewählt.

Die Prüfung wurde im Hinblick auf folgende Parameter durchgeführt:

- Visuelle Beurteilung der Membranen
- Nenn-Härte nach DIN ISO 48:2009
- Zugfestigkeit/Reißdehnung nach DIN 53504:1994
- Druckverformungsreste nach DIN ISO 815:2008
- Dichte/Flächengewicht nach DIN EN ISO 1183-1:2012

Bei der visuellen Beurteilung wurde festgestellt, dass beide Membrantypen rot-braune Verfärbungen aufwiesen, wobei die Verfärbung der TPU-Membranen ausgeprägter waren als die der Silikonmembranen (s. Abbildung 28). Weder bei den Silikon- noch bei den TPU-Membranen konnten mittels lichtmikroskopischer Untersuchung Ablagerungen im Inneren der Belüfterelemente festgestellt werden.

(Hinweis: Im Bericht der KIWA-MPA weisen Tabelle 1 und Abbildung 2 Widersprüche bei den geprüften Belüftern auf. Des Weiteren sind die Abbildungsunterschriften von Abbildung 1 und 2 vertauscht.)



Abbildung 28: links: neue Silikonmembran; Mitte: Silikonmembran nach Ausbau; rechts: TPU-Membran nach Ausbau

Die Bestimmung der Härte zeigte, dass die Härtewerte der beanspruchten Membranen beider Materialtypen gegenüber der Referenz im Mittel um 3-5% höher waren. Auch bei der Bestimmung der Zugfestigkeit/Reißdehnung war Einfluss der Beanspruchung erkennbar. Der Zug-Spannungsmittelwerte der drei getesteten Silikonmembranen stieg um 22,7% gegenüber der Referenz auf 5,7 N/mm<sup>2</sup>, der Mittelwert der TPU-Membranen sank hingegen um 27,5% auf 6,4 N/mm<sup>2</sup>. Die TPU-Membranen wiesen zwar aufgrund ihrer Materialeigenschaften eine höhere Zugfestigkeit auf, aber mit steigender Beanspruchung nahm diese ab. Auf die Silikonmembranen hatte die Beanspruchung einen Gegenteiligen Einfluss. Nach längerer Beanspruchung zeigten sie eine erhöhte Zugfestigkeit.

Bei der Ermittlung der Druckverformungsreste konnten bei beiden Typen keine wesentlichen Unterschiede im Verhalten der beanspruchten Membranen gegenüber Referenz nachgewiesen werden.

In Bezug auf die Reversibilität nach 30 Minuten wurde jedoch festgestellt, dass der Ausgangszustand bei den Silikonmembranen im Gegensatz zu den TPU-Membranen bereits nach 30 Minuten annähernd wieder erreicht wurde. Nach 24h hatten beide Materialien ihre Ausgangsdicke wieder erreicht.

Die Materialprüfung lässt laut der „Kiwa GmbH“ keine Rückschlüsse auf die Funktionalität der Belüftermembranen zu. Lediglich die erhöhte Zugfestigkeit/Reißdehnung der Silikonmembranen nach der Beanspruchung war vorteilhaft, da dieser Kennwert auf eine höhere Festigkeit bei leicht erhöhtem Dehnvermögen ohne Versprödung hinweist.

#### 4.5 Betriebliches

Im Betrieb der Versuchsanlage konnten verschiedene Schwachpunkte identifiziert werden, die für die großtechnische Umsetzung eine andere bzw. optimierte technische Ausführung erfordern:

1. Die Schlauchleitung zu den Belüftersträngen:

Der Beginn der Versuche zur Mitbehandlung in der Belebung wurde verzögert, da der Schlauch hinter dem Kompressor mehrfach riss. Dies war darauf zurückzuführen, dass es keine metallische Verbindung zwischen dem Kompressor und dem Schlauch gab. Der Schlauch konnte daher der Erwärmung durch die Luftkompression nicht standhalten.

Zudem dehnte sich die Schlauchleitung während des Betriebes der Anlage stark aus, wurde damit zur „Stolperfalle“ und riss aufgrund der Ausdehnung wiederholt (s. Abbildung 29).

## 2. Nicht vorhandene oder mangelhafte Kondensatentleerung:

Die Schlauchleitungen enthielten Kondensat, das bei der Abkühlung der Abluft auf Umgebungstemperatur entstand. Dieses wurde durch eine nachträglich angebrachte Kondensatentleerung manuell abgelassen. Trotzdem verblieb ein Teil des Kondensates in der Anlage. Des Weiteren war das Gestänge der Kondensatharken an den Belüftersträngen nicht ausreichend befestigt. Es löste sich beim Öffnen und Schließen von der Harke selbst.

Für das Kondensat im Verbindungsschlauch zwischen Hauben und Messkästen war keine Kondensatentleerung vorgesehen. Es entstanden Kondensatsäcke. Durch eine stabilere Verbindung hätte die Bildung von Kondensatsäcken vermieden werden können.



Abbildung 29: Belüfter mit ausgedehnter Schlauchleitung

## 3. Mechanismus der Schieber an den Belüftersträngen:

Der Kurbelmechanismus der Schieber war mit Andauern der Versuche immer schwerer zu betätigen. Der Schieber 7 ließ sich nach ca. 6 Wochen nicht mehr vollständig schließen.

## 4. Hauben über der Belebung:

Die Befestigung der schwimmenden Hauben mit Seilen war für die Strömungsverhältnisse im Belebungsbecken nicht ausreichend. Die Seile lösten sich und die Hauben bewegten sich mit der Strömung. Des Weiteren riss bereits nach einer Woche zum ersten Mal der Verbindungsschlauch zwischen Hauben und Messkästen (s. Abbildung 30).



Abbildung 30: Defekte an den schwimmenden Hauben

#### 5. Kalibrierung der Sauerstoffsonden in der Belebung:

Zu Beginn der Versuche waren die fest installierten, elektrochemischen Sauerstoffsonden im Becken 3.2 nicht kalibriert. Dies verfälschte die Ergebnisse der Substitutions- und Querempfindlichkeitsversuche. Erst am 21.10.2013 wurde eine Kalibrierung der Sauerstoffsonden der Linie 3 (Becken 3.1 und 3.2) vorgenommen

### 4.6 Betriebskosten der Mitbehandlung

Für den Betrieb der Mitbehandlung sind folgende Kosten zu berücksichtigen:

- Energiebedarf (Kompressor)
- Personalkosten
- Wartungskosten
- Prozesswasser (Kondensat)

An dieser Stelle werden nur der Energiebedarf und die Personalkosten betrachtet. Die Wartungskosten und internen Prozesswässer werden in dieser Arbeit nicht betrachtet. Wartungskosten werden i.d.R. über einen Prozentsatz der Investitionskosten abgeschätzt. Die Investitionskosten werden von BWB berechnet, die folglich auch die Abschätzung der Wartungskosten übernehmen. Für das Kondensat kann angenommen werden, dass dessen Anteil an internen Prozesswässern sehr gering und damit vernachlässigbar ist. Bei allen Angaben handelt es sich um Netto-Preise.

Für die Personalkosten werden angenommen:

- Wartungszeit pro Tag: 0.5 h
- Stundensatz Personal (Annahme): 50 €/h

Daraus ergeben sich Personalkosten von 9125 € pro Jahr.

Für die Berechnung der Energiekosten wird von einem zu behandelnden Abluftvolumenstrom ( $Q_{Abl}$ ) von 10.000 Nm<sup>3</sup>/h ausgegangen. Der Volumenstrom der Hauptbelüftung ( $Q_{Bel}$ ) beträgt ebenfalls 10.000 Nm<sup>3</sup>/h. Es muss im Hinblick auf die Betriebskosten festgelegt werden, ob bzw. in wie weit der Volumenstrom der Hauptbelüftung durch den Volumenstrom der Abluft ( $Q_{Abl}$ ) ersetzt werden kann (Substitution, s. Kapitel 4.2). Der zu be-

handelnde Abluftvolumenstrom reduziert sich um den Anteil, der die Hauptbelüftung ersetzt (s. Abbildung 31). Für die Berechnung werden im Folgenden verschiedene Substitutionsgrade von 0%, 50% und 80% angenommen.

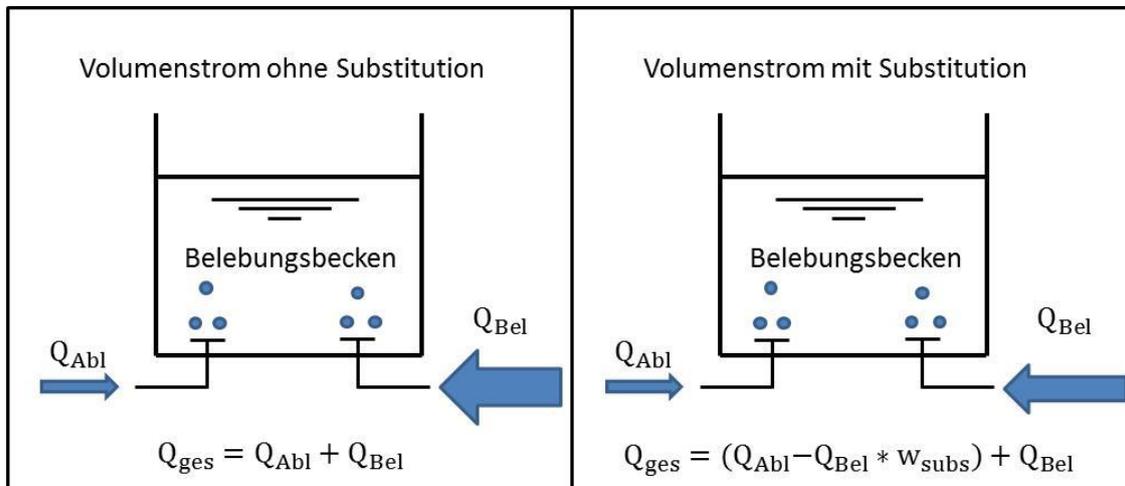


Abbildung 31: Luftvolumenströme in das Belebungsbecken; links: ohne Substitution; rechts: mit Substitution,  $w_{subs}$  ist der Anteil der Hauptbelüftung, der durch Abluft ersetzt werden kann

Des Weiteren werden für die Energiekosten folgenden Annahmen getroffen:

- Strompreis: 0,16 €/kWh
- Spez. Leistungsaufnahme Gebläse im Betriebspunkt: 0,028 kW/Nm<sup>3</sup>
- Jährliche Betriebsstunden (bei 24 h/d, 365 d/a): 8760 h/a

Die jährlichen Energiekosten für das Einleiten der Abluft berechnen sich folglich zu:

$$\rightarrow \text{Energiekosten pro Jahr} = ((Q_{Abl} - w_{Substitution} \cdot Q_{Bel}) \cdot$$

spez. Energiebedarf Gebläse \* Betriebsstunden pro Jahr \* Strompreis

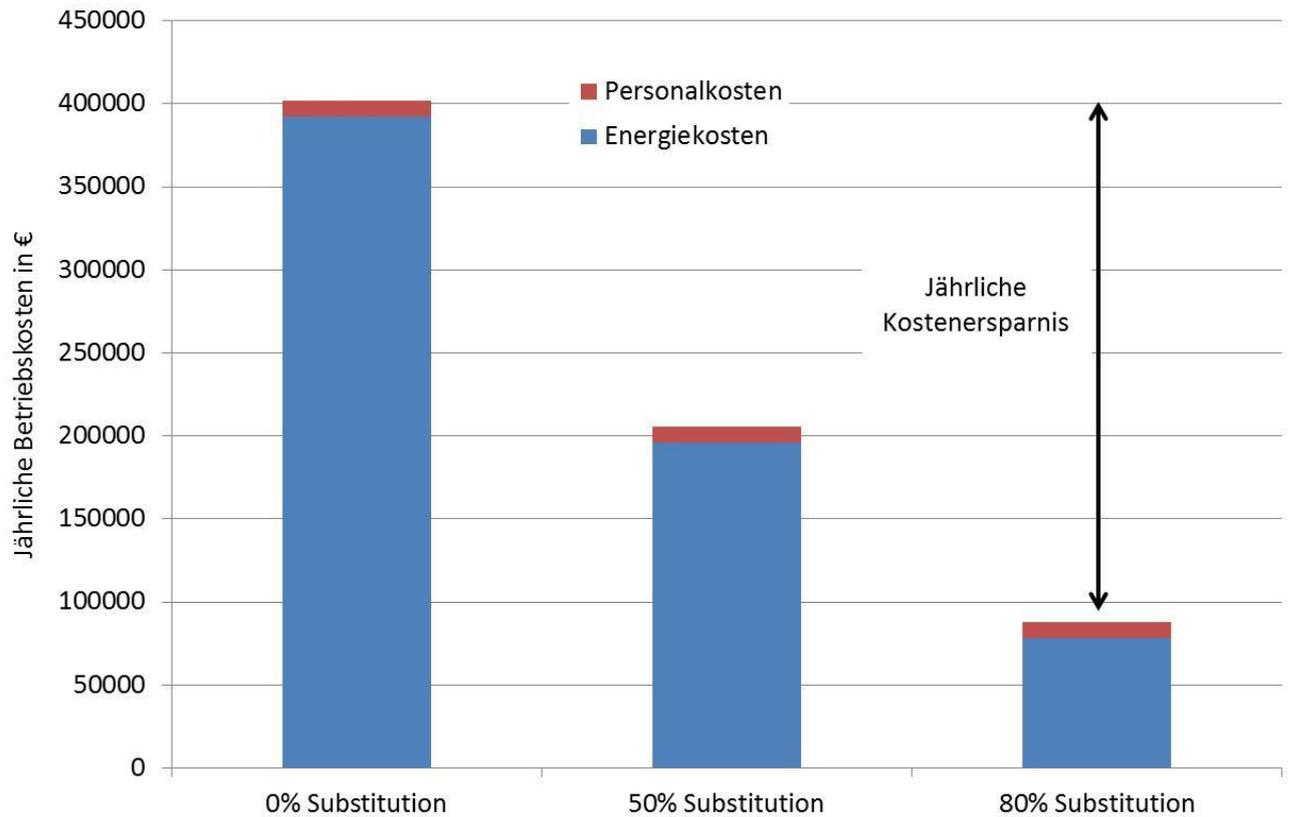
→ Annahme: keine Substitution

$$\rightarrow 10.000 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \cdot 0,028 \frac{\text{kW}}{\text{Nm}^3} \cdot 8760 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 0,16 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 392.448 \frac{\text{€}}{\text{a}}$$

→ Annahme: 80% Substitution

$$\rightarrow \left(10.000 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} - 0,8 \cdot 10.000 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}}\right) \cdot 0,028 \frac{\text{kW}}{\text{Nm}^3} \cdot 8760 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 0,16 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 78.490 \frac{\text{€}}{\text{a}}$$

→ Kostenersparnis: 313.958  $\frac{\text{€}}{\text{a}}$



**Abbildung 32: Betriebskosten der Mitbehandlung in Abhängigkeit vom Substitutionsgrad**

Anhand der Abbildung 32 wird deutlich, dass die Personalkosten nur einen geringen Anteil an den Gesamtkosten haben, je nach Substitutionsgrad zwischen 2% und 8%. Der Großteil der Kosten geht auf die Energiekosten zurück. Diese schwanken in Abhängigkeit vom Grad der Substitution zwischen 80 k€/a und 400 k€/a.

## 5. Versuche an der UV-Anlage

Die UV-Behandlung gasförmiger Emissionen basiert auf der Anregung von Molekülen mittels kurzwelliger Strahlung. Jeder Stoff hat ein anderes Absorptionsspektrum und reagiert damit auf unterschiedlicher Wellenlängen. Je kürzer die Wellenlänge, desto energiereicher die Strahlung. Für die Elimination von Schwefelwasserstoff wird vorwiegend Licht der Wellenlänge 185 nm genutzt, da in diesem Bereich das Absorptionsmaximum liegt. Bei der UV-Behandlung von schwefelwasserstoffhaltiger Abluft finden mehrere Prozesse parallel statt. Zum einen wird der Schwefelwasserstoff direkt angeregt und gespalten, zum anderen wird der in der Luft vorhandene Sauerstoff ebenfalls angeregt und bildet Ozon. Dieses oxidiert den Schwefelwasserstoff, seine Spaltprodukte und andere reaktive Inhaltsstoffe in der Abluft. Bei der Oxidation von Schwefelwasserstoff durch Ozon entsteht im ersten Reaktionsschritt Schwefeldioxid und im zweiten Reaktionsschritt Schwefeltrioxid. Daneben finden weitere Reaktionen zwischen dem gebildeten Ozon und den Spaltprodukten des Schwefelwasserstoffes statt.

### 5.1 Versuchsaufbau

Die Abluft (Rohgas) wurde zur UV-Anlage geführt und mittels UV-Oxidation im „UV-Reaktor“ behandelt. In einem nachgeschalteten Aktivkohlefilter bestehend aus 35 Kartuschen des Fabrikats Camfil/571764 reagierte das verbleibende Ozon (Restozonvernichter).

Das Reingas wurde über eine gewundene Rohrleitung abgeführt. Messstellen waren nach jedem Anlagenteil angeordnet, um die Prozesse in den einzelnen Aggregaten erfassen zu können (s. Abbildung 33.)

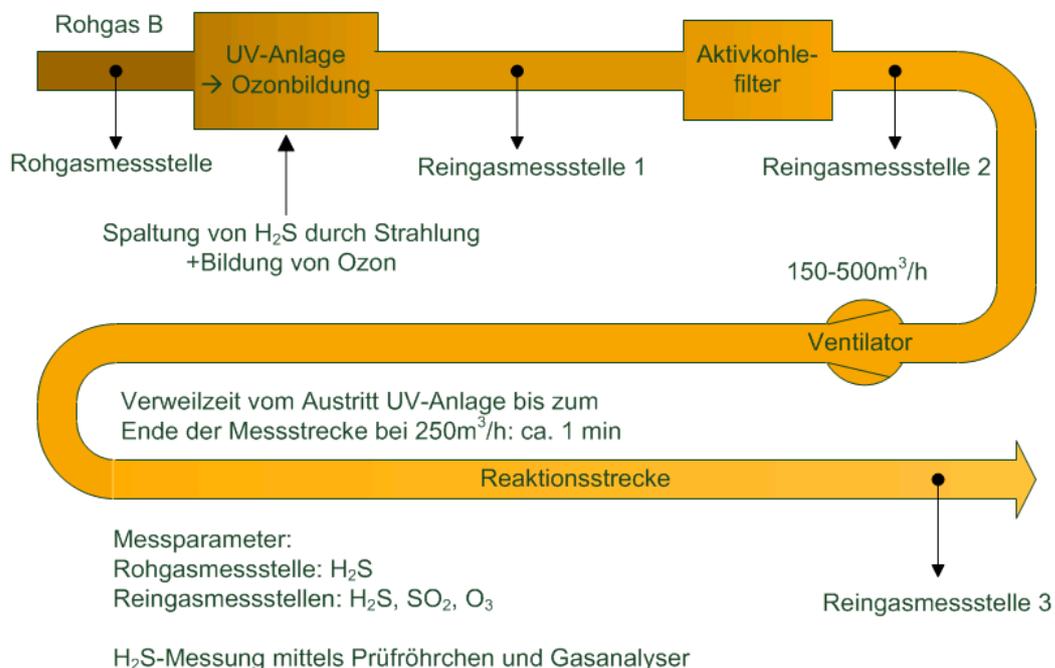


Abbildung 33: Schematischer Aufbau der UV-Anlage inklusive der Probenahmestellen und gemessenen Parameter

Der Reaktor der UV-Anlage selbst bestand aus vier Stufen durch die das Rohgas geleitet wurde. Der Reaktor war während der Versuchsphase mit 36 bzw. 72 UV-Lampen ausgestattet, die Licht mit einer Wellenlänge von 185 nm emittierten und einen Energiebedarf von 80 W pro Lampe hatten (s. Abbildung 34).

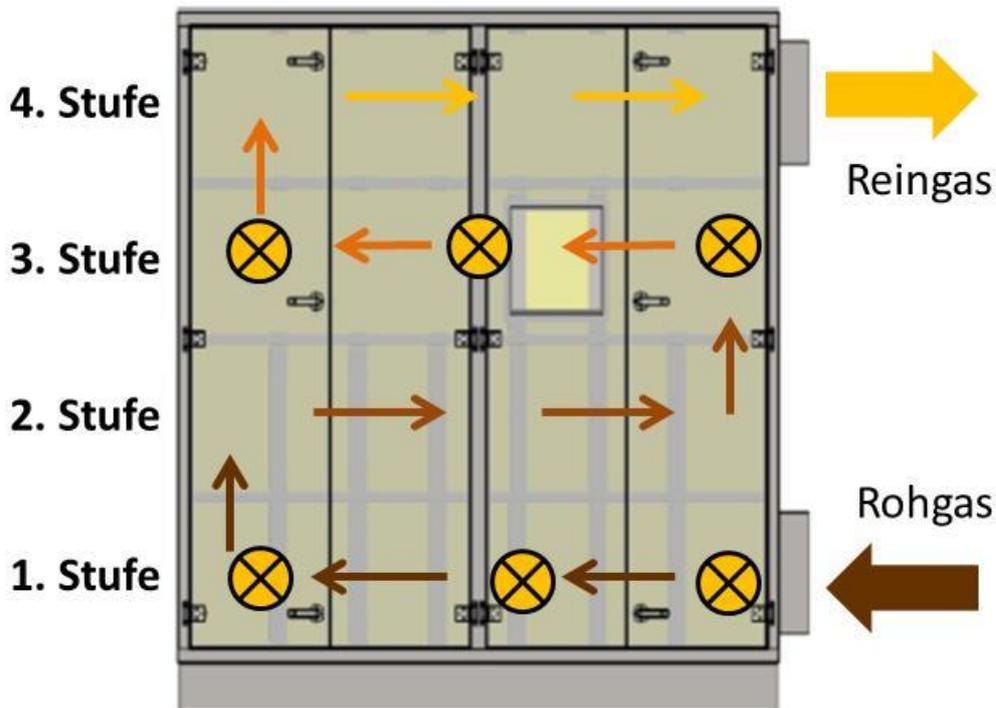


Abbildung 34: Aufbau des UV-Reaktors. Zu Beginn des Versuchszeitraumes waren die 1. und 3. Stufe mit jeweils 18 Lampen ausgerüstet, am 13.09. erfolgte die Leistungserhöhung, indem zusätzlich 36 Lampen in der 4. Stufe installierten wurden

Der Volumenstrom konnte über einen Regler am Ventilator von 150-500 m<sup>3</sup>/h reguliert werden. Der Versuch lässt sich anhand der eingestellten Parameter und Betriebszustände in mehrere Phasen unterteilen (s. Tabelle 12).

## 5.2 Versuchsverlauf

Im Rahmen der Vorversuche wurden an der UV-Anlage verschiedene Einstellungen getestet. Dazu wurden der Abluftvolumenstrom, sowie der Energieeintrag variiert. Es stellte sich zu Beginn der Versuche heraus, dass Schwefelwasserstoff am Aktivkohlefilter, der ursprünglich als Restozonvernichter dienen sollte, adsorbierte. Der Aktivkohlefilter wurde, nachdem seine Adsorptionskapazität erschöpft war, entfernt. Im weiteren Versuchsverlauf wurde der Volumenstrom von 250 m<sup>3</sup>/h auf 150 m<sup>3</sup>/h reduziert und die Lampenleistung verdoppelt. Der detaillierte Versuchsverlauf ist der Tabelle 12 zu entnehmen.

Tabelle 12: Volumenstrom und Lampenanzahl im zeitlichen Verlauf, Berechnung des Energieverbrauchs auf Basis der installierten Leistung; für die Phase 6 wird als Volumenstrom der Mittelwert der Handmessungen (N=5) zu Grunde gelegt

Datum	15.08.- 22.08.	22.08.- 27.08.	27.08.- 13.09.	13.09.- 26.09.	26.09.- 08.10.	08.10-24.10
Phase	1	2	3	4	5	6
Volumenstrom in m <sup>3</sup> /h	250	150	150	250	150	Volumenstromregler defekt, ca. 540
Anzahl der Lam- pen	36	36	36	72	72	72
Energieverbrauch in kWh/m <sup>3</sup>	0,012	0,019	0,019	0,023	0,38	0,011

- Phase 1: Nach der UV-Oxidation verbliebener Schwefelwasserstoff adsorbierte am Aktivkohlefilter (AK). Dieser war ursprünglich als Restozonvernichter geplant. Die Adsorption des Schwefelwasserstoffes war nicht die gewünschte Funktion des Aktivkohlefilters.
- Phase 2: Reduktion des Volumenstromes von 250 m<sup>3</sup>/h auf 150 m<sup>3</sup>/h
- Phase 3: Die Adsorptionskapazität des Aktivkohlefilters war erschöpft, die Schwefelwasserstoffkonzentrationen vor und nach dem Aktivkohlefilter gleich, die Aktivkohle wurde aus dem Gehäuse entfernt, die Heizung des AK ausgeschaltet und das Gehäuse als Reaktionsraum genutzt. Die Online-Messung im Reingas erfolgte fortan am Ende der Messstrecke
- Phase 4: Verdopplung der Lampenleistung und Erhöhung des Volumenstroms auf 250 m<sup>3</sup>/h
- Phase 5: Erneute Reduktion auf 150 m<sup>3</sup>/h
- Phase 6: Geplante Erhöhung des Volumenstromes auf 500 m<sup>3</sup>/h konnte wegen eines defekten Volumenstromreglers nicht durchgeführt werden.

Es ist anzumerken, dass es über den gesamten Versuchszeitraum zu Lampenausfällen kam. Diese wurden durch die Herstellerfirma schnellst möglich behoben. Bei den Angaben wurden die Lampenausfälle in der Berechnung nicht berücksichtigt.

### 5.3 Versuchsprogramm

Mit den Versuchen an der UV-Anlage sollten folgenden Fragen beantwortet werden:

1. In wie weit kann die Schwefelwasserstoffkonzentration mittels UV-Oxidation gesenkt werden?
2. Hat der Volumenstrom Einfluss auf die Reinigungsleistung der Anlage?
3. In welchen Mengen werden Ozon und Schwefeldioxid gebildet?
4. Wie viel Belag bildet sich auf den Lampen bzw. in wie weit gibt es Feststoffablagerungen in der Anlage?
5. Kommt es aufgrund der hohen Schwefelwasserstoffkonzentrationen im Rohgas zur Korrosion von Bauteilen (Kontakten etc.)
6. Wird auch die Geruchsstoff-Konzentration unter den Grenzwert von 500 GE/m<sup>3</sup> gesenkt?

### 5.4 Versuchsdurchführung an der UV-Anlage, Ergebnisdarstellung und Diskussion

Die Ergebnisse der Messungen an der UV-Anlage werden im Folgenden dargestellt. Es ist vorwegzunehmen, dass die chemischen Prozesse innerhalb der UV Anlage nicht vollständig aufgeschlüsselt, die obigen Fragen jedoch hinreichend geklärt werden konnten. Im Vordergrund stand wie bei den Versuchen an der Mitbehandlung die Frage nach der Reduktion der Schwefelwasserstoffkonzentration in der Abluft.

Zu Fragestellung 1 und 2:

1. In wie weit kann die Schwefelwasserstoffkonzentration mittels UV-Oxidation gesenkt werden?
2. Hat der Volumenstrom Einfluss auf die Reinigungsleistung der Anlage?

Es wurden dazu die Schwefelwasserstoffkonzentrationen im Roh- und Reingas der UV-Anlage bei verschiedenen Volumenströmen (s. Kapitel 5.2). gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass in keiner der Versuchsphasen bei den vorliegenden Rohgaskonzentrationen die Reingaskonzentration unter den AGW von 5 ppm gesenkt werden konnte. Auch über die Reaktionsstrecke wurde keine ausreichende Verringerung erreicht. Lediglich an einem Versuchstag konnte die Schwefelwasserstoffkonzentration auf 20 ppm am Ende der Messstrecke gesenkt werden. Auch die Variation des Volumenstroms zeigte keine Auswirkung auf die Konzentration im Reingas.

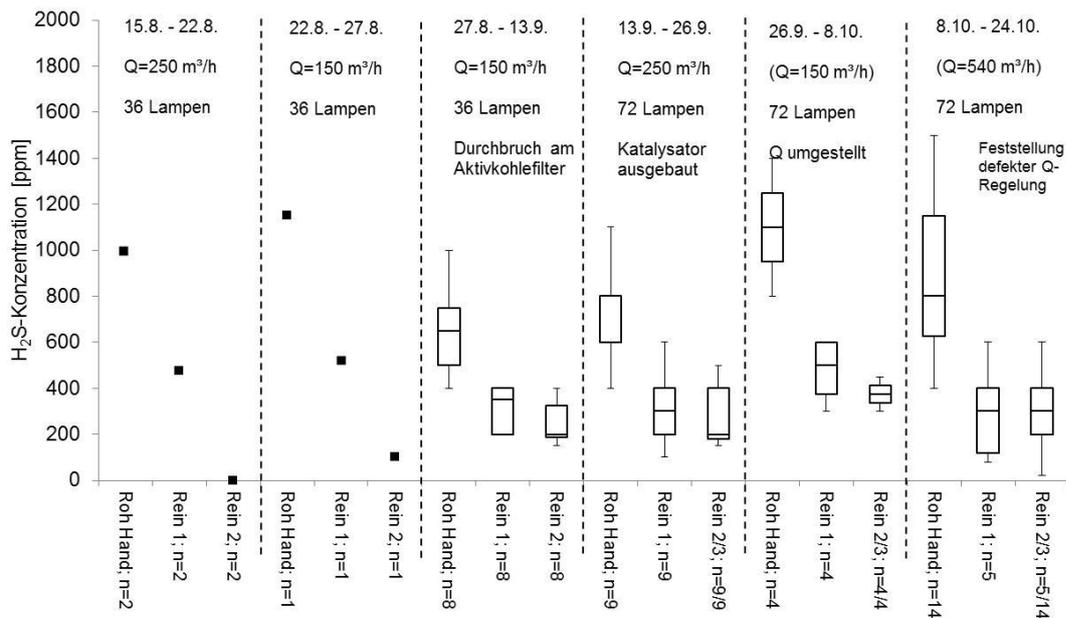


Abbildung 35: Boxplot der Schwefelwasserstoffkonzentrationen, für die Messstellen Reingas 2 und 3 wurde der Mittelwert über alle Werte der entsprechenden Phase gebildet, für den Zeitraum der defekten Volumenstromregelung ist der Mittelwert der Handmessungen angegeben (N=5)

### 3. In welchen Mengen werden Ozon, Schwefeldioxid und ggf. Schwefeltrioxid gebildet?

Bei dem verwendeten Verfahren wurde der Luftsauerstoff angeregt und es bildete sich Ozon (s. Kapitel 5.1). Ozon ist sowohl toxisch als auch brandfördernd. Es gilt ein Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) von 0,1 ppm. Die in der Anlage gebildete Menge an Ozon wurden erfasst, um eine erste Abschätzung hinsichtlich der Einhaltung des Grenzwertes und des Gefahrenpotentials vornehmen zu können.

In Phase 1-3 (vor Erhöhung der Lampenleistung) war im Mittel 2 ppm Ozon vor dem Aktivkohlefilter im Reingas. Hinter dem Aktivkohlefilter lag die Konzentration bei 0 ppm. Dies blieb auch nach dem Durchbruch des Aktivkohlefilters unverändert. Erst in Phase 4 nachdem die Aktivkohle entfernt worden war, wurde im Reingas Ozon festgestellt (s. Tabelle 13).

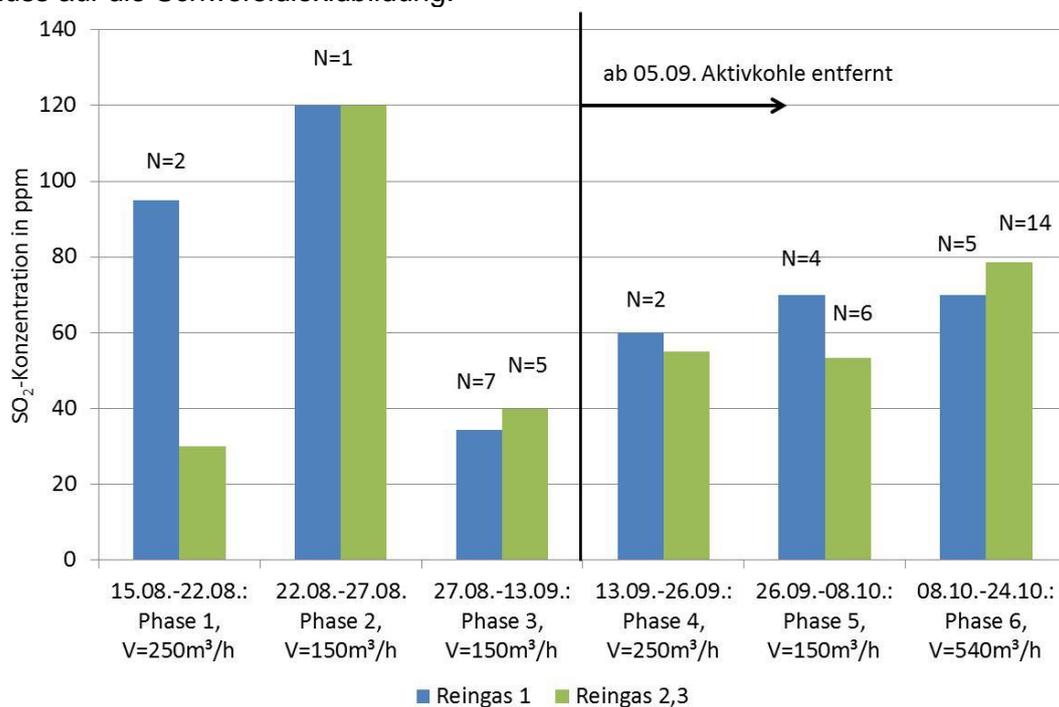
Die Bildung von Ozon veränderte sich mit der Lampenleistung. Nach Erhöhung der Lampenleistung waren im Durchschnitt mehr als 3 ppm im Reingas. Der Arbeitsplatzgrenzwert von 0,1 ppm wurde überschritten. Es konnte keine genaue Konzentration ermittelt werden, da die Prüfröhrchen mit dem Messbereich > 3 ppm ein anderes Messprinzip hatten und eine Querempfindlichkeit zu Schwefeldioxid zeigten (s. Kapitel 6.2). An drei Messtagen war die Ozonkonzentration noch im Messbereich (20.09.: 3ppm, 23.10.:3 ppm und 24.10.: 2.5 ppm). Vermutlich war die Ozonkonzentration auch an den anderen Versuchstagen nicht wesentlich größer als 3 ppm.

**Tabelle 13: Mittlere Ozonkonzentrationen vor und nach dem Aktivkohlefilter, Phase 1-3: Reingas vor dem AK N=8, Phase 3-6 N=20**

Phase	Mittlere Ozonkonzentration in ppm	
	Reingas 1	Reingas 2 und 3
1-3	2	0
3-6	>3	>3

Bei der Oxidation des Schwefelwasserstoffes ist Schwefeldioxid ein Reaktionsprodukt. Die gemittelten Schwefeldioxidkonzentrationen an den verschiedenen Messstellen über die Versuchsphasen sind in Abbildung 36 dargestellt. Sie schwankten zwischen 30 ppm und 120 ppm.

Die Adsorptionskapazität des Aktivkohlefilters war nach dem 22.08. nach ca. 250 Betriebsstunden erschöpft, die Schwefeldioxidkonzentrationen vor und nach dem Aktivkohlefilter glichen sich an (Phase 2). Die Erhöhung der Lampenleistung hatte keinen Einfluss auf die Schwefeldioxidbildung.



**Abbildung 36: Mittelwerte der Schwefeldioxidkonzentration in den verschiedenen Versuchsphasen, es wurde ein Mittelwert über alle Messungen an den Messstellen Reingas 2 und 3 gebildet**

In Abschnitt 4.2.1 der TA-Luft sind für die Immission von Schwefeldioxid je nach Zeitraum unterschiedliche Grenzwerte festgelegt (s. Tabelle 14).

Bei einem mittleren Schwefeldioxidausstoß von 0,035 kg/h und einem Volumenstrom von 250 m<sup>3</sup>/h werden 140000 µg/m<sup>3</sup> Schwefeldioxid emittiert. Eine Überschreitung der Grenzwerte ist wahrscheinlich. Eine genaue Aussage kann nicht getroffen werden, da keine Kenntnis über die Verbindung von Emissionen und Immissionen besteht.

Tabelle 14: Immissionsgrenzwerte für Schwefeldioxid über verschiedene Zeiträume und die zulässigen Überschreitungshäufigkeiten (TA Luft Abschnitt 4.2.1)

Zeitspanne	Grenzwert (Mittelwert über die entspr. Zeitspanne)		Max. zulässige Überschreitungshäufigkeit pro Jahr
	In $\mu\text{g}/\text{m}^3$	In ppm	
365 d	50	19	
24h	125	47	3
1h	350	131,5	24

Im Rahmen der Versuche konnte die Schwefeltrioxidkonzentration im Abgas nicht bestimmt werden, da kein geeignetes Verfahren zur Verfügung stand. Allerdings lässt sich anhand der Schwefelbilanz die Menge an gebildetem Schwefeltrioxid abschätzen. In Abbildung 36 sind die Schwefelfrachten an einzelnen Versuchstagen über die verschiedenen Versuchsphasen dargestellt. Zu Beginn verblieb ca. 50% des Schwefelwasserstoffes im Aktivkohlefilter. Nach dem Durchbruch des Aktivkohlefilters finden sich ca. 30-60% des eingetragenen Schwefels als Schwefelwasserstoff im Reingas wieder. Schwefeldioxid macht ca. 10-20% der Schwefelwasserstofffracht im Reingas aus.

Über die gesamte Versuchsdauer konnte ein Großteil der Schwefelfracht nicht erfasst werden. Es ist anzunehmen, dass es sich dabei einerseits um Schwefelablagerungen als Feststoff in der Anlage, andererseits im Schwefeltrioxid handelt.

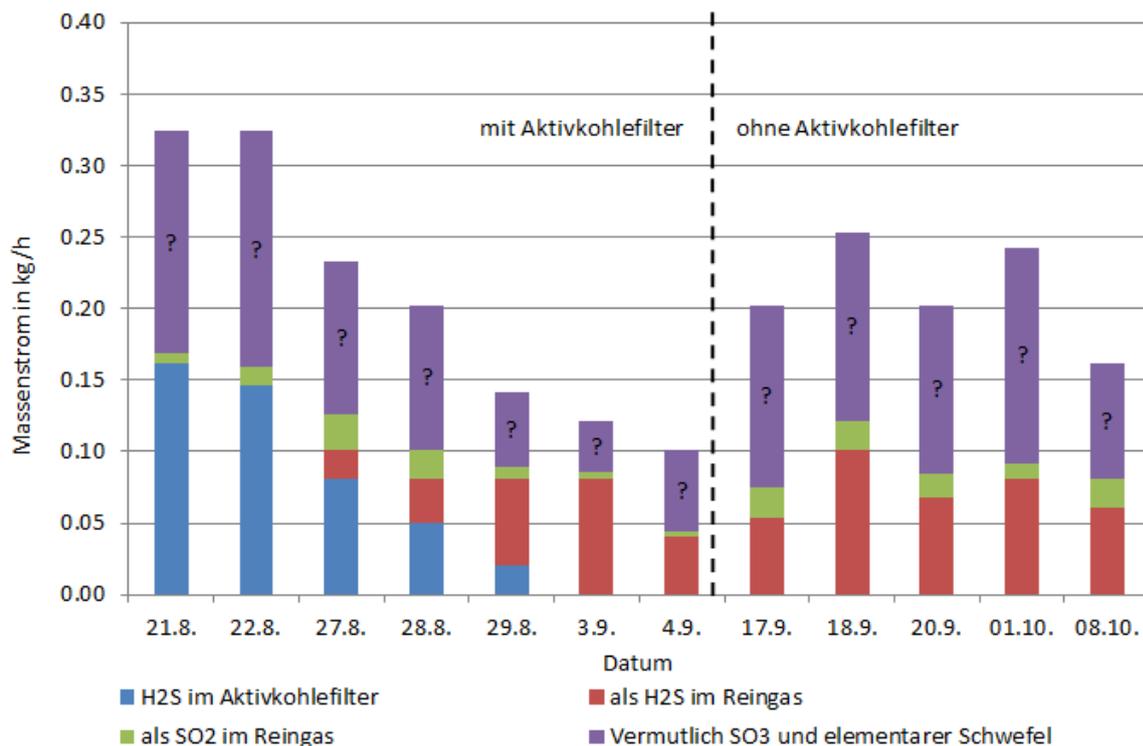


Abbildung 37: Schwefelbilanz für einzelne Tage aus den verschiedenen Versuchsphasen

Im Hinblick auf die unzureichende Reinigungsleistung stellte sich die Frage, ob diese durch Belagbildung auf den Lampen gemindert wurde. Zudem wurde überprüft, ob es durch die hohen Schwefelwasserstoffkonzentrationen im Rohgas zu Korrosion an Bauteilen kam.

4. Wie viel Belag bildet sich auf den Lampen bzw. in wie weit gibt es Feststoffablagerungen in der Anlage?

5. Kommt es zu Korrosion von Bauteilen (Kontakten etc.) aufgrund der hohen Schwefelwasserstoffkonzentrationen im Rohgas

Dies wurde mittels folgender Maßnahmen abgeschätzt:

- Optische Begutachtung der Strahler und Fotodokumentation
- Probenahme von den Strahlern durch Abwischen und Analyse (s. Kapitel 2.1)
- Analyse der Ablagerungen aus den Rohrleitungen nach Abbau der Anlage (s. Kapitel 2.1)
- Messung der Strahlungsleistung der Lampen nach dem Ausbau im ungewaschenen Zustand
- Regelmäßige Überprüfung der Bauteile durch die Herstellerfirma „Aerozone“
- Optische Prüfung auf Lampenausfälle etc.

Bereits nach zwei Wochen war eine Belagbildung sowohl auf den Strahlern, als auch im Sichtfenster des Reaktors zu erkennen. Diese Belagbildung wurde von ersten Lampenausfällen begleitet (s. Abbildung 38).

Mit Andauern des Versuches vielen weitere Lampen aus. Der Reaktor wurde am 05.09.2013 geöffnet und die Kontakte der Lampen überprüft. Diese waren bereits aufgrund der hohen Schwefelwasserstoffkonzentrationen im Rohgas und der daraus gebildeten Schwefelsäure korrodiert und wurden ausgetauscht. Auch andere metallische Bauteile, wie z.B. Schrauben etc. waren stark korrodiert.



**Abbildung 38: Sichtfenster des UV-Reaktors mit gelbem Belag; rechtsseitig: Lampen funktionieren; linksseitig: Lampen sind defekt**

Der Belag auf den Strahlern wurde abgewischt, ließ sich aber nicht vollständig entfernen. Die Analyse ergab, dass Schwefel die dominierende Verbindung im Belag war (vollständige Analyse im Anhang I). Die vermehrte Belagbildung (s. Abbildung 39) könnte zudem eine Erklärung für die unzureichende Reinigungsleistung sein. Nach dem Ausbau wurde die Strahlungsintensität von drei ungereinigten Lampen bestimmt. Die Belagbildung auf den Lampen entsprach einem Zeitraum von drei Wochen. In Abbildung 40 ist der Verlauf der gemessenen Strahlungsleistung dargestellt. Daraus geht hervor, dass sich die Strahlungsleistung durch die Belagbildung bereits auf ca. 10-20% des ursprünglichen Wertes verringert hatte. Dies erklärt die unzureichende Schwefelwasserstoffentfernung.

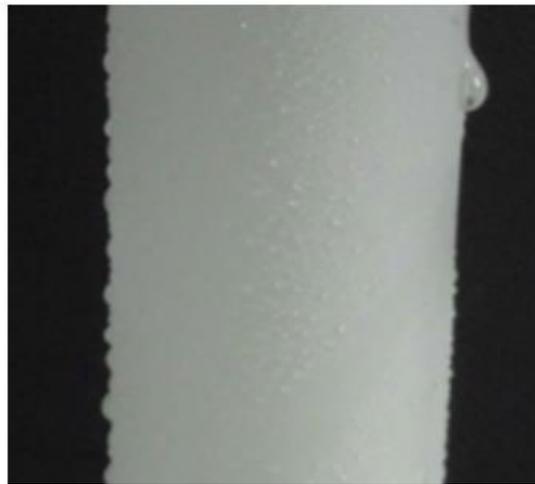


Abbildung 39: links: neue Strahler vor dem Einbau in den UV-Reaktor; rechts: Strahler nach ca. 500 Betriebsstunden (12.09.2013)

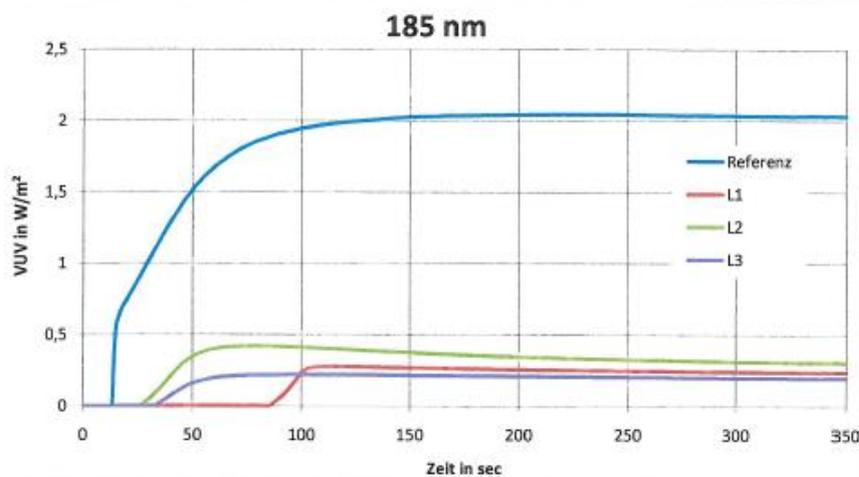


Abbildung 40: Strahlungsleistung einer neuen Lampe im Vergleich zur verbliebenen Strahlungsleistung von drei Lampen, die über einen Betriebszeitraum von drei Wochen nicht gereinigten wurden bei 185 nm, verwendeter Sensor: VUV Meter Jenoptik Berlin

Am 08.10. wurde festgestellt, dass der Volumenstromregler defekt war. Beim Abbau der Anlage am 24.10. wurde in den Rohrleitungen und dem Gehäuse des Aktivkohlefilters ein weißlich, gelbes Pulver gefunden (s. Abbildung 41), das zu 27% aus Schwefel bestand (vollständige Analyse im Anhang I) und vermutlich zu einer Verblockung des Volumenstromreglers geführt hatte.

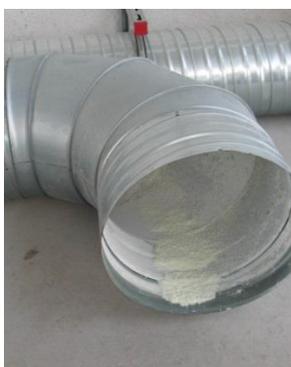


Abbildung 41: Vor dem Aktivkohlefilter ausgebaute Rohrleitung mit pulverartigen Feststoffablagerungen

6. Wird auch die Geruchsstoff-Konzentration unter den Grenzwert von 500 GE/m<sup>3</sup> gesenkt?
- Olfaktometrische Messungen im Rohgas und Reingas an den verschiedenen Messstellen

Entscheidend war neben der Reinigungsleistung auch die Verringerung der Geruchsstoff-Konzentration. Es wurde nach dem gleichen Verfahren wie in der Mitbehandlung überprüft, ob die Geruchsstoff-Konzentration unter den Grenzwert von 500 GE/m<sup>3</sup> gesenkt wird (vgl. Kapitel 4.2):

Die Ergebnisse der olfaktometrischen Messungen sind in Tabelle 15 aufgelistet. Die Messungen erfolgten vor dem Durchbruch und nach dem Ausbau des Aktivkohlefilters.

**Tabelle 15: Ergebnisse der olfaktometrischen Messung im Roh- und Reingas der UV Anlage**

	Rohgas		Reingas 1 vor AK		Reingas 3 Ende der MS	
29.07.2013 Vor Durchbruch AK						
Geruchsstoff-Konzentration in GE/m <sup>3</sup>	38.968	32.768			7.732	3.251
H <sub>2</sub> S-Konzentration in ppm	600	400			2,5	3
24.09.2013 Nach Ausbau AK						
Geruchsstoff-Konzentration in GE/m <sup>3</sup>	165.140	155.872	55.109	73.562	9.742	9.742
H <sub>2</sub> S-Konzentration in ppm	1100		600		500	

Die Geruchsstoff-Konzentration konnte zwar entlang der Messstrecke verringert werden, aber die Reduktion war bei beiden Messungen nicht ausreichend, um die Geruchsstoff-Konzentration unter den Grenzwert von 500 GE/m<sup>3</sup> zu senken.

## 5.5 Betriebskosten der UV-Anlage

Bei der UV-Anlage wurden die Betriebskosten auf Basis des maximalen spezifischen Energiebedarfs innerhalb der Versuchsdauer berechnet. Es war nicht möglich den Zielwert von 5 ppm Schwefelwasserstoff für die Behandlung der Abluft zu erreichen. Es konnte kein Zusammenhang zwischen Leistungserhöhung und Reinigungsleistung festgestellt werden. Eine Extrapolation der benötigten Leistung ist aus diesem Grund nicht möglich.

Die Betriebskosten der UV-Anlage setzen sich aus folgenden Kosten zusammen:

- Energiekosten bestehend aus Energiebedarf der Lampen und des Ventilators
- Personalkosten
- Wartungskosten
- Kosten für Reinigung und Austausch der Lampen

Nur die Energie- und Personalkosten können berechnet werden. Bei allen Angaben handelt es sich um Netto-Preise. Für die Lebensdauer der Lampen liegen aufgrund der erhöhten Korrosionsgefahr durch den hohen Schwefelwasserstoffgehalt in der zu behandelnden Abluft keine belastbaren Daten vor. Für die Reinigung der Lampen ist darauf hinzuweisen, dass sich während der Versuchsdauer ein schwer zu lösender, saurer Be-

lag gebildet hat, der wesentlich zur Verringerung der Lampen- und damit zur Verringerung der Reinigungsleistung beigetragen hat. Die Berechnung der Kosten für die regelmäßige Reinigung der Lampen muss folglich auf einer technischen Lösung basieren, bei der diese Beläge ausreichend entfernt werden.

Die Personalkosten können analog zur Mitbehandlung errechnet werden. Für die Personalkosten werden angenommen:

- Wartungszeit pro Tag: 0.5 h
- Stundensatz Personal (geschätzt): 50€/h

Daraus ergeben sich Personalkosten von 9125€ pro Jahr.

Für die Berechnung der Energiekosten wird die im Versuchsbetrieb maximal installierte Lampenleistung bei kleinstem behandeltem Volumenstrom angenommen. Es werden folgende Kennzahlen zu Grunde gelegt (Kenndaten Phase 4, s. Kapitel 5.2)

- Anzahl der Lampen: 72
- Energiebedarf pro Lampe: 80W
- Energiebedarf der 72 Lampen: 5,76 kW
- Behandelte Volumenstrom im Versuchsbetrieb: 150 m<sup>3</sup>/h
- Spezifischer Energiebedarf der Lampen: 0,0384 kWh/m<sup>3</sup>
- Jährliche Betriebsstunden (bei 24 h/d, 365 d/a): 8760 h/a

In einem großtechnischen Betrieb einer UV-Anlage ein Volumenstrom von 10.000 m<sup>3</sup>/h behandelt werden.

Ein Energiepreis von 0,16 €/kWh wird zu Grunde gelegt. Nicht berücksichtigt sind in dieser Rechnung durch das Scale-Up verursachte nicht vorhersehbare Änderungen im Energiebedarf.

→ Jährliche Energiekosten der Lampen:

$$\begin{aligned} \text{Energiekosten Lampen pro Jahr: } & 0,0384 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} * 10.000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * 8760 \frac{\text{h}}{\text{a}} * 0,16 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \\ & = 538.214 \frac{\text{€}}{\text{a}} \end{aligned}$$

Der für einen Volumenstrom von 10.000 m<sup>3</sup>/h benötigte Ventilator hat einen Energiebedarf von 7,5 kW. Daraus ergeben sich folgende Energiekosten des Ventilators:

- Energiebedarf Ventilator: 7,5 kW
- Betriebsstunden pro Jahr: 8760 h/a
- Jährlicher Energiebedarf des Ventilators: 65.700 kWh/a

→ Jährliche Betriebskosten:

$$\text{Energiekosten Ventilator pro Jahr: } 7,5 \text{ kW} * 8760 \frac{\text{h}}{\text{a}} * 0,16 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 10512 \frac{\text{€}}{\text{a}}$$

→ Summe der Energiekosten (Lampen + Ventilator): 548.726 €/a

## 6. Fehlerbetrachtung

Es wurden für beide Versuchsanlagen der allgemeine Versuchsaufbau, der Ort der Probenahme, die korrekte Auswahl des Messverfahrens, sowie dessen Durchführung geprüft.

### 6.1 Messungen im Gas

#### 6.1.1 Volumenstrom Rohgas

Im Aufbau der Versuchsanlagen war keine Messung des Volumenstroms vorgesehen. Weder im Rohgasvolumenstrom zur Mitbehandlung, noch im Rohgasvolumenstrom zur UV-Anlage. Es wurden Handmessungen mit einem Flügelradmesser durchgeführt, um sicherzustellen, dass die berechnete Abluftmenge in die Versuchsanlagen gelangte. Für die Mitbehandlung entsprechen 240 Nm<sup>3</sup>/h umgerechnet 267m<sup>3</sup>/h.

Die berechnete Strömungsgeschwindigkeit im Rohgasvolumenstrom der Mitbehandlung betrug 1 m/s. Das verwendete Flügelrad (12 mm Durchmesser) ist für Geschwindigkeiten von 0,6-20 m/s geeignet. Es wird vom Hersteller ein Fehler von +/- 2.5 % vom Endwert angegeben. Pro Messung wurde die Geschwindigkeit über den Rohrquerschnitt dreimal ermittelt.

Am 08.10. sollte der Volumenstrom der UV-Anlage auf 500 m<sup>3</sup>/h angehoben werden, dabei wurde der defekte Volumenstromregler bemerkt. Folgende Geschwindigkeiten wurden im Rohgas gemessen:

**Tabelle 16: Gemessene Volumenströme zur Mitbehandlung und UV-Anlage in m<sup>3</sup>/h, \*Messung nicht vom KWB durchgeführt**

Datum	Ermittelter Volumenstrom in m <sup>3</sup> /h		Soll-Volumenstrom in m <sup>3</sup> /h	
	BB	UV	BB	UV
29.07.2013*	n.b.	333	267	250
22.08.2013	127	n.b.	267	
24.09.2013	n.b.	700		250
10.10.2013*	n.b.	600	267	500 m <sup>3</sup> /h
16.10.2013	326	382	267	500 m <sup>3</sup> /h
17.10.2013	374	531	267	500 m <sup>3</sup> /h
22.10.2013	220	599	267	500 m <sup>3</sup> /h
24.10.2013	407	569	267	500 m <sup>3</sup> /h
29.10.2013	301		267	500 m <sup>3</sup> /h
30.10.2013	431		267	500 m <sup>3</sup> /h
01.11.2013	293		267	500 m <sup>3</sup> /h

Mögliche Gründe für die großen Schwankungen:

- Keine laminare Strömung
- Unterschiedliche Strömungsverhältnisse über den Rohrquerschnitt
- Bewegung über den Rohrquerschnitt erfolgte nicht immer mit der selben Geschwindigkeit
- Ausrichtung des Flügelradmessers per Hand

Anhand der Messwerte lässt sich trotz der Ungenauigkeit der Handmessung zeigen, dass der berechnete bzw. eingestellte Volumenstrom eher überschritten wird.

### 6.1.2 Rohgaskonzentration in der Zuleitung zur Mitbehandlung in der Belebung

Es wurde überprüft, ob sich die im Rohgas gemessene Schwefelwasserstoffkonzentration in der Zuleitung zur Mitbehandlung, z.B. durch Auswaschung im gebildeten Kondensat, verringert.

Es wurde dazu die Schwefelwasserstoffkonzentration zu Beginn der Zuleitung (Messstelle Rohgas A) und kurz vor Eintritt in die Belüfterharken am Kondensatablass der Zuleitung gemessen. Bei einer Messung lässt sich eine Verringerung der Konzentration erkennen (s. Tabelle 17).

Tabelle 17: Schwefelwasserstoffkonzentrationen zur Beginn und vor Eintritt in die Mitbehandlung

Datum	Beginn Zuleitung	Vor Eintritt Belüfterharken
02.10.2013	600	600
08.10.2013	1200	1200
09.10.2013	1200	1200
10.10.2013	1800	1600

### 6.1.3 Prüfröhrchen

Die Messgenauigkeit der Prüfröhrchen wurde mit Prüfgas getestet. Das Prüfgas hatte eine Konzentration von 103 ppm. Es wurden Prüfröhrchen verschiedener Messbereiche (1-240 ppm und 0.25-120 ppm) getestet. Mit beiden Prüfröhrchentypen wurde eine Konzentration von 100 ppm ermittelt. Eine genauere Auflösung war aufgrund der Skalierung der Prüfröhrchen nicht möglich (s. Abbildung 42).

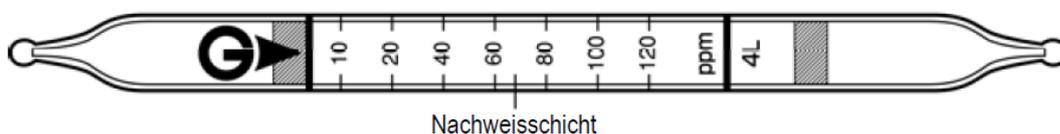


Abbildung 42: Schematische Darstellung eines Prüfröhrchens

### 6.1.4 GA 5000 (Gasanalyser)

Der GA 5000 hat laut Herstellerangabe für die unterschiedlichen Parameter folgende Abweichungen:

**Tabelle 18: Messbereiche und Fehler des GA 5000**

Komponente	Messbereich	Fehler
CH <sub>4</sub>	0 ... 70 Vol.-%	± 0,5 Vol.-%
CO <sub>2</sub>	0 ... 60 Vol.-%	± 0,5 Vol.-%
O <sub>2</sub>	0 ... 25 Vol.-%	± 1,0 Vol.-%
H <sub>2</sub> S	<b>0 ... 10.000 ppm</b>	± 5,0 %
Luftdruck	± 500 mbar	± 5,0 %
Relativdruck	± 500 mbar	± 4,0 bis ± 15,0 mbar
Temperatur	-10 ... +75 °C	± 0,5 K

Neben den in Tabelle 18 dargestellten Messungenauigkeiten war der Druckausgleich eine weitere Fehlerquelle. Bei dem Druckausgleich musste darauf geachtet werden, die Lage des Schlauches, über den das Gas in den GA 5000 gesogen wurde, nicht zu verändern. Das Gerät wurde während der Messung vom Benutzer in der Hand gehalten. Kleine Veränderungen in der Schlauchposition und damit in den Druckverhältnissen waren daher nicht zu vermeiden.

Des Weiteren gab es auch während der Ermittlung der Druckverhältnisse und während der Messung leichte Druckschwankungen in den Versuchsanlagen.

In Tabelle 19 werden die mit dem GA 5000 ermittelten Schwefelwasserstoffkonzentrationen mit den Konzentrationen verglichen, die mit den Prüfröhrchen gemessen wurden. Es ist zu berücksichtigen, dass der GA 5000 und die Prüfröhrchen verschiedene Auflösungen haben. Der GA 5000 löst auf 1 ppm genau auf. Die Skala der Prüfröhrchen lässt je nach Messbereich verschiedenen Auflösungen von 0,1 ppm bis 100 ppm zu.

**Tabelle 19: Mittelwert der Schwefelwasserstoffkonzentrationen im Rohgas über den gesamten Versuchszeitraum**

	Mittlere Schwefelwasserstoffkonzentration in ppm	
	GA 5000	Prüfröhrchen
Rohgas Mitbehandlung (N=36)	786	889
Rohgas UV-Anlage (N=34)	787	829

Die Rohgaskonzentration unterlag starken Schwankungen. Ein kurzer zeitlicher Abstand zwischen den Messungen führte ggf. zu großen Konzentrationsunterschieden. Die Messungen mit dem GA 5000 und den Prüfröhrchen erfolgten zwar so zeitnah wie möglich, jedoch nahm die Druckanpassung, die vor jeder Messung mit dem GA 5000 durchgeführt werden musste, einige Minuten in Anspruch.

Es ist aber festzustellen, dass mit beiden Messverfahren ähnliche Schwefelwasserstoffkonzentrationen ermittelt wurden. Die Konzentrationen des GA 5000 liegen dabei leicht unter denen der Prüfröhrchen. Dies stimmt mit der Überprüfung mittels Prüfgas überein.

Bei einer Prüfgaskonzentration von 103 ppm lieferte der GA 5000 einen Wert von 85 ppm.

## 6.2 Reingasmessung Mitbehandlung

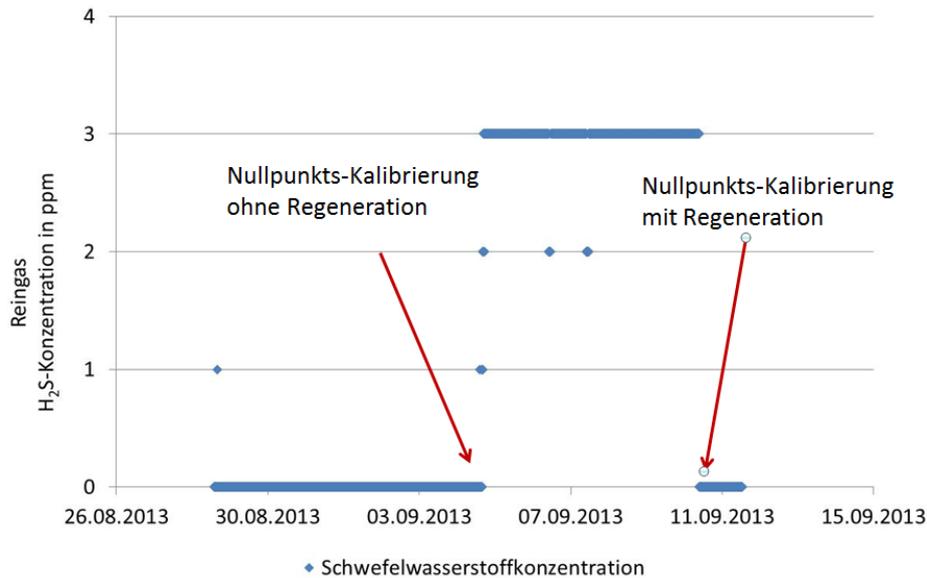
Bei der Reingasmessung in der Mitbehandlung wurde die Position der Hauben kontrolliert. Dazu wurde mehrfach der Kohlenstoffdioxidgehalt im Reingas bei abgeschalteter Hauptbelüftung bestimmt (s. Tabelle 20). Bei korrekter Positionierung der Hauben müsste dieser deutlich über dem Umgebungswert von 0,03% liegen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Hauben das Reingas aus den Abluft-Belüftern aufgefangen haben.

**Tabelle 20: CO<sub>2</sub>-Gehalt im Reingas, \*die Messung wurde nicht mit dem GA 5000, sondern dem Multi-gaswarngerät GasAlertMicro 5 IR durchgeführt**

Datum	Zone	Volumenstrom Rohgas in Nm <sup>3</sup> /h	CO <sub>2</sub> -Gehalt in %
*27.08.2013	2.3	5	2
05.09.2013	2.3	5	2.2
05.09.2013	3.7	5,3	1
12.09.2013	0.1	6	2.1
12.09.2013	3.6	8	2.6
17.09.2013	2.2	6,7	2.6

### 6.2.1 Online-Messung im Reingas mit den Odalogs

Neben der Position der Hauben, war die Regeneration der Odalogs zu beachten. Vor Versuchsbeginn wurden diese zwar durch BWB gewartet und kalibriert, doch nach zwei Wochen Betrieb musste erneut eine Nullpunkts-Kalibrierung (Frischluf-Nullung) durchgeführt werden. Es fand vorher keine Regeneration statt. Dies führte zu einer Verschiebung des Nullpunktes und damit zu fälschlich angezeigten Schwefelwasserstoffkonzentrationen 2-4 ppm (s. Abbildung 43). Die fehlerhafte Nullpunktsverschiebung wurde durch eine erneute Nullpunkts-Kalibrierung nach hinreichender Regenerationszeit korrigiert. Für die verbleibende Versuchsdauer wurden die Regenerationszyklen genau eingehalten. Die maximal angezeigte Schwefelwasserstoffkonzentration betrug danach 1 ppm. Der Hersteller gibt für den genutzten Gerätetyp einen Fehler von +/- 1 ppm an. Messwerte von 1 ppm traten auch innerhalb der Regenerationszyklen in schwefelwasserstofffreier Umgebung auf. Dies zeigt, dass es sich um eine Abweichung innerhalb des Messfehlers handelt.



**Abbildung 43: Beispiel für das Verhalten der Odalogs nach Nullpunkts-Kalibrierung mit und ohne Regeneration**

Die Genauigkeit der Odalogs wurde ebenfalls mittels Prüfgas (Schwefelwasserstoffkonzentration 103 ppm) getestet. Es wurde die Kalibriervorrichtung genutzt, um das Gas in den Odalog zuleiten. Die Messung ergab eine Konzentration von 121 ppm. Die Abweichung ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Odalogs auf 34 ppm kalibriert wurden, da sie vor allem im unteren Messbereich genau sein sollten.

## 6.3 Messtechnik der UV-Anlage

### 6.3.1 Online-Messtechnik

An der UV-Anlage wurde sowohl die Schwefelwasserstoffkonzentration im Rohgas als auch die im Reingas mittels Online-Messtechnik bestimmt. Die Online- und Handmessungen im Rohgas stimmten gut überein (s. Abbildung 44).

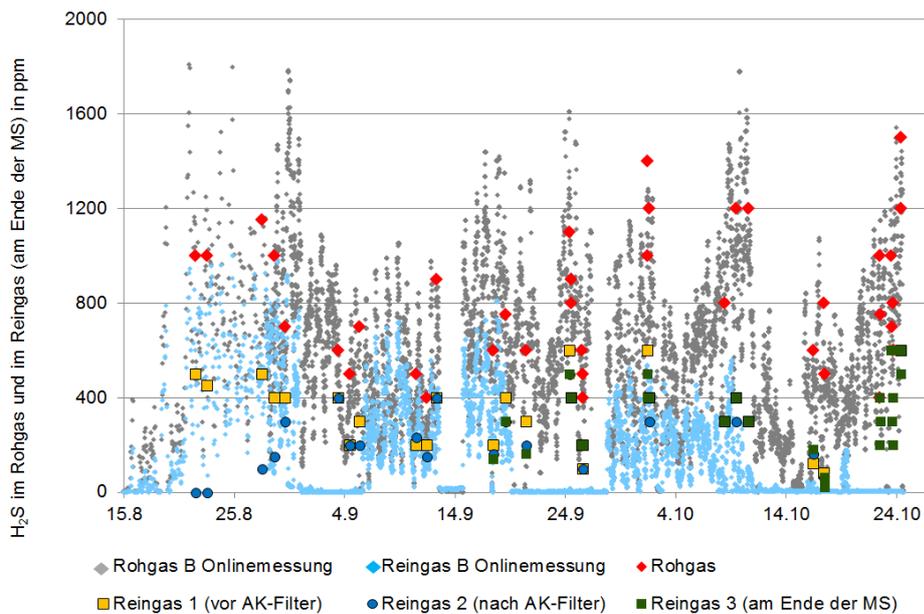


Abbildung 44: Online- und Handmessungen der Schwefelwasserstoffkonzentration im Roh- und Reingas ab dem 15.08. (Wiederinbetriebnahme der Anlage)

Schwierigkeiten traten unerwartet bei der Reingasmessung auf. Diese zeigt über mehrere Tage 0 ppm bei unverändert hohen Rohgaskonzentrationen an. Per Handmessung wurden 200 ppm und 100 ppm im Reingas nach dem UV-Reaktor bestimmt (s. Abbildung 45)

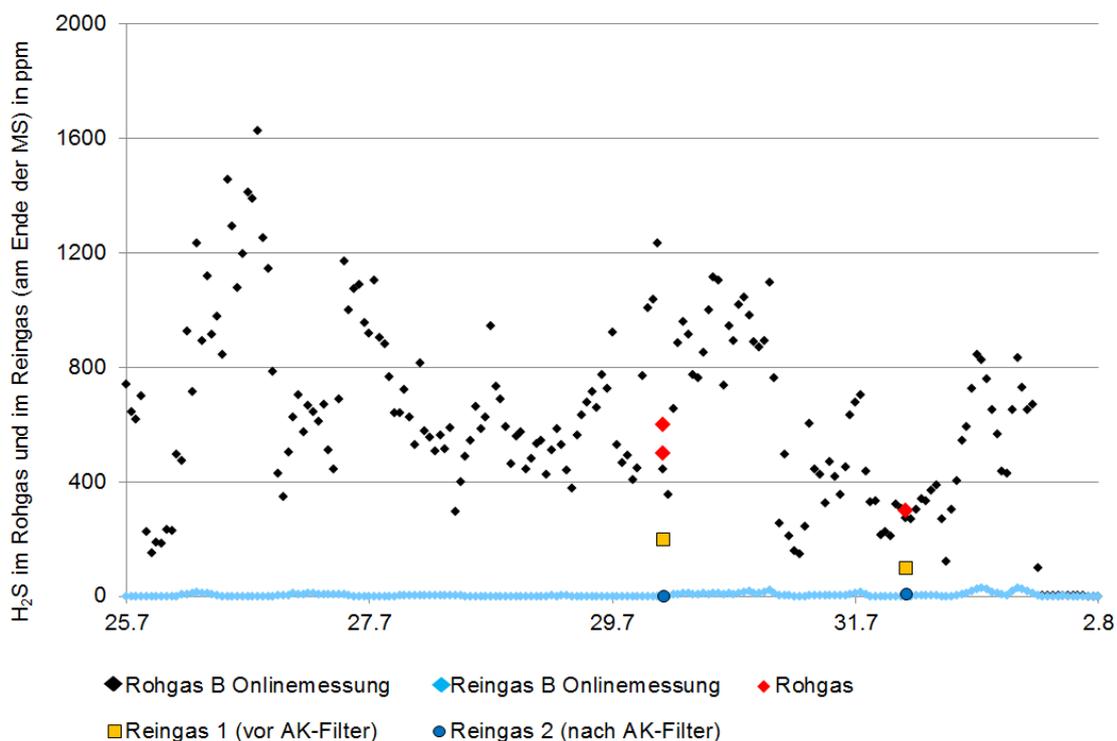


Abbildung 45: Online- und Handmessungen der Schwefelwasserstoffkonzentration im Roh- und Reingas vom 25.07. (Inbetriebnahme) bis zum Ausfall der UEG Messung

Am 22.08. wurde der Reingassensor durch GFU überprüft. Es wurde kein Defekt festgestellt. Im Laufe der Versuchsdauer wurden immer wieder über mehrere Tage 0 ppm im

Reingas gemessen. Ein Test des Sensors durch GFU vier Tage nach Außerbetriebnahme der Anlage am 28.10.2013 zeigt wieder keine Auffälligkeiten.

Bei der Online-Messung handelte es sich um eine diskontinuierliche Messung mit einer Messung pro Stunde. In der verbliebenen Zeit wurde der Sensor mit Umgebungsluft gespült.

Als die Überprüfung des Sensors statt fand war die Anlage bereits mehrere Tage mit Umgebungsluft gelaufen. Möglicherweise war die Spülzeit von einer Stunde zu gering. Das Reingas hatte eine relative Luftfeuchte von ca. 90%. Es kann folglich durch die hohe Feuchte des Gases zu Verstopfungen der Membranen im Sensor gekommen sein, so dass der Durchfluss stark verringert wurde. Zudem wurden gelbliche Ablagerungen in den Leitungen gefunden (s. Abbildung 46), die ebenfalls den Durchfluss gemindert haben könnten. Dies erklärt jedoch nicht, dass die Rohgasmessung, sowie die Schwefeldioxidmessung, die neben der Schwefelwasserstoffmessung im Reingas angeordnet war, keine ähnlichen Ausfälle zeigten.

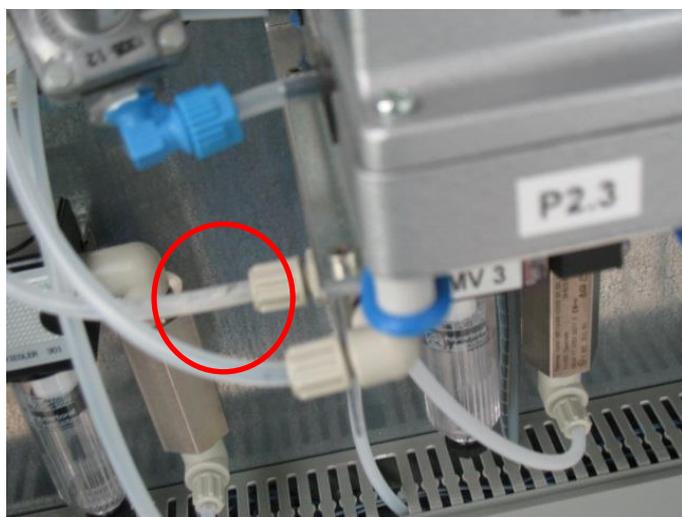


Abbildung 46: Zuleitungen am Schwefelwasserstoffsensoren mit Ablagerungen

### 6.3.2 Ozonmessung

Ein weiterer Parameter, der an der UV-Anlage gemessen wurde war die Ozonkonzentration im Reingas. Die Prüfröhrchen mit dem Messbereich bis 3 ppm basierten auf der Oxidation des Farbstoffes Indigo durch Ozon. Bei den Prüfröhrchen des Messbereiches 4-400 ppm hingegen wurde eine Säure-Base-Reaktion für den Farbumschlag genutzt. Der Farbumschlag der Röhrchen ging statt von Orange nach Hell-gelb von Orange nach Rot. In der Anleitung wird als Grund für den Farbumschlag nach Rot eine Querempfindlichkeit angegeben. Im Reingas gab es viele Komponenten z.B. Schwefeldioxid, die als Säure fungieren und damit eine Querempfindlichkeit zu Ozon erzeugen konnten.

## 7. Fazit

Zwei Verfahren zur Behandlung der Abluft wurden an der Kläranlage Schönerlinde im Rahmen der Vorversuche getestet, die Mitbehandlung in der Belebung und die UV-Oxidation. Ziel war es, sowohl die Verringerung von Schwefelwasserstoff, als auch betriebliche Aspekte zu durchleuchten.

Die Schwefelwasserstoffkonzentration der Abluft über dem belüfteten Sandfang lag im Mittel bei 634 ppm unter der Abdeckung des belüfteten Sandfanges und bei 563 ppm an der Messstelle der Online-Messung im Rohgas.

Für das Behandlungsverfahren Mitbehandlung in der Belebung konnte im Rahmen der Vorversuche kein Durchbruch von H<sub>2</sub>S festgestellt werden. An zwei Versuchstagen wurde eine H<sub>2</sub>S-Konzentration von 0,1 ppm in Zone 0 bei einem Volumenstrom von 6 Nm<sup>3</sup>/h bzw. 8 Nm<sup>3</sup>/h gemessen. Die Schwefelwasserstoffkonzentration im Rohgas, das der Mitbehandlung zugeführt wurde, lag an diesen Versuchstagen bei 800 ppm bzw. 400 ppm. Es gab weder Unterschiede zwischen der Reinigungsleistung der beiden Belüftertypen (TPU und Silikon) noch zwischen den Zonen im Belebungsbecken.

Entscheidend ist, dass der Arbeitsplatzgrenzwert von 5 ppm über die gesamte Versuchsdauer eingehalten wurde.

Bei der Prüfung der Druckverluste der verschiedenen Belüftertypen wurde festgestellt, dass die Silikonbelüfter höhere Druckverluste als die Belüfter aus TPU aufwiesen. Zudem stieg der Druckverlust der Silikonbelüfter mit Erhöhung der Beaufschlagung stärker an. Belüfter mit einem hohen Druckverlust sind für den Anlagenbetrieb weniger geeignet, da sie unter gleichen Bedingungen einen höheren Energieverbrauch als Belüfter mit einem niedrigeren Druckverlust haben.

Die Prüfung der beiden Membranmaterialien zeigte, dass die TPU-Membranen stärkere Ablagerungen aufwiesen, als die Silikonmembranen. Die Zugfestigkeit der Silikonbelüfter nahm mit erhöhter Beanspruchung zu. Bei den TPU-Belüftern hingegen wurde durch eine vermehrte Beanspruchung die Zugfestigkeit verringert.

Die Geruchsstoff-Konzentration wurde an mehreren Versuchstagen ermittelt. Diese lag bei allen Messungen an der Mitbehandlung unter dem Grenzwert von 500 GE/m<sup>3</sup>.

Das Kondensat, das sich in den Belüfterharken bildete, wies einen niedrigeren pH-Wert als das Kondensat in der Zuleitung auf. Das Kondensat in den Belüfterharken hatte einen mittleren pH-Wert von 4,5 und einen minimalen pH-Wert von 1,5. Des Weiteren wurde Kondensat mit mehrwöchiger Standzeit in den Belüfterharken beprobt. Der pH-Wert lag zwischen 3 und 4. Der minimale pH-Wert von 1,5 sowie die maximale Sulfatkonzentration von 471 mg/l sind ausschlaggebend für die Materialauswahl.

Der Einfluss des Schwefelwasserstoffes auf die Biozönose im Belebtschlamm wurde untersucht. Anhand der Analyse des Belebtschlammes konnten bei der eingetragenen Abluftmenge von 240 Nm<sup>3</sup>/h keine negative Veränderung der Biozönose festgestellt werden.

Eine Reduzierung der Betriebskosten wäre möglich, wenn sich die Hauptbelüftung teilweise durch Abluft ersetzen ließe. Mit 19-21% Sauerstoffgehalt in der Abluft ist es theoretisch möglich einen Großteil der Hauptbelüftung zu substituieren. Es konnte anhand der Substitutionsversuche keine eindeutige Aussage gemacht werden, da die eingebrachte Abluftmenge im Vergleich zur Hauptbelüftung zu gering war. Der Anteil der Energie- an den Betriebskosten beträgt ohne Substitution der Hauptbelüftung 392.448 €/a. Werden 80% der Hauptbelüftung durch Abluft ersetzt, reduzieren sich die Energiekosten auf 78.490 €/a.

Die parallele Messung der Sauerstoffkonzentration mit einer optischen und einer elektrochemischen Sonde während der Substitutionsversuche gab keinen Hinweis auf eine Querempfindlichkeit der elektrochemischen Messung zu Schwefelwasserstoff.

Im Gegensatz zum Behandlungsverfahren der Mitbehandlung in der Belebung konnte die Schwefelwasserstoffkonzentration mittels UV-Oxidation bei den vorliegenden hohen Rohgaskonzentrationen nicht unter den AGW von 5 ppm gesenkt werden. Die Schwefelwasserstoffkonzentration wurde lediglich um 40-60% auf 314 ppm im Mittel reduziert. Weder eine Verringerung des Volumenstroms noch eine Verdopplung der Lampenleistung (von 36 auf 72 installierte Lampen) konnten die Reinigungsleistung verbessern. Auch die Geruchsstoff-Konzentration konnte nicht unter den Grenzwert gesenkt werden. Ein Teil der Versuche wurde mit einem Aktivkohlefilter nach der UV-Oxidation durchgeführt. Dieser Filter adsorbierte den Schwefelwasserstoff und ermöglichte eine Verringerung der Schwefelwasserstoffkonzentration. Er hatte ursprünglich die Funktion eines „Restozonvernichters“. Es wurde festgestellt, dass sich Feststoffe in der Anlage bildeten. In der gesamten Anlage wurde ein gelblich weißes Pulver bzw. ein gelblich weißer Belag gefunden. Das Pulver bestand zu 27% aus Schwefel. Feststoffablagerungen in der Anlage und Belagbildung auf Lampen führten dazu, dass ein stabiler Betrieb nur eingeschränkt gewährleistet werden konnte und die Strahlungsleistung der Lampen stark verringert wurde. Durch den schwefelhaltigen Belag auf den Lampen wurde die Strahlungsleistung bereits nach drei Wochen auf 10-20% des ursprünglichen Wertes gesenkt, was die unzureichende Reinigungsleistung erklärt.

Der Betrieb war unzuverlässig, da regelmäßig Lampen aufgrund von Korrosion der Kontakte ausfielen. Die Feststoffablagerungen zerstörten wahrscheinlich den Volumenstromregler. Wegen der mangelnden Reinigungsleistung und betrieblichen Stabilität kann ein solches Verfahren für eine großtechnische Umsetzung nicht empfohlen werden.

## 7.1 Empfehlungen für großtechnische Erprobung

In der großtechnischen Erprobung wird das Verfahren der Mitbehandlung in der Belebung umgesetzt. Aus den Vorversuchen konnten dafür bereits wichtige Erkenntnisse gewonnen werden. Diese werden im Folgenden nach inhaltlichen und technischen Gesichtspunkten gegliedert aufgeführt.

Inhaltliche Fragen, die in der großtechnischen Erprobung untersucht werden sollen:

- Hat der Eintrag großer Mengen an schwefelwasserstoffhaltiger Abluft einen negativen Einfluss auf die Biozönose und Schlammstruktur im Belebungsbecken?
- In wie weit kann die Hauptbelüftung durch Abluft ersetzt werden?
- Bilanzierung der Schwefelfrachten sowohl in der Gas- als auch in der Wasserphase

Für den Versuchsaufbau der großtechnischen Erprobung sollten im Hinblick auf die Erkenntnisse aus den Vorversuchen und die inhaltlichen Fragen folgende technische Aspekte berücksichtigt werden:

- Installation einer Durchflussmessung, die die Menge der zugeführten Abluft erfasst.
- Der niedrigste im Kondensat gemessene pH-Wert lag bei 1,5 in den Belüfterharken, die Sulfatkonzentration im Kondensat betrug maximal 471 mg/l, beide Parameter sind bei der Materialauswahl zu berücksichtigen.
- Es sind sowohl in der Zuleitung als auch in den Belüfterharken größere Mengen Kondensat angefallen, die eine manuelle Kondensatentleerung ausschließen. Im Versuchsaufbau der großtechnischen Erprobung muss die Kondensatführung zu einem Tiefpunkt aller Rohrleitungen vorgesehen werden, um das Kondensat von dort automatisch ableiten zu können.

- Online-Messung der Schwefelwasserstoffkonzentration in der aus dem belüfteten Sandfang abgezogenen Abluft und in der Zuleitung zur Mitbehandlung, um die Schwankungsbreite der Schwefelwasserstoffkonzentration über einen längeren Zeitraum erfassen zu können.
- Für eine Online-Messung im Reingas (sofern gewünscht) werden OdaLogs mit einem kleineren Messbereich empfohlen („OdaLog low range“). Zu beachten ist, dass diese größere Abmessungen als die herkömmlichen OdaLogs haben.
- Es muss eine hinreichend große Menge Abluft im Vergleich zur Hauptbelüftung ins Belebungsbecken eingebracht werden.
- Beständigere Ausführung der Konstruktion zur Messungen des Reingases. Dazu müssen die Hauben stärker auf dem Belebungsbecken fixiert werden, die Verbindung zwischen Hauben und Messkästen muss stabiler sein und die Bildung von Kondensatsäcken ausgeschlossen werden. Es wird empfohlen, keine Alu-Schläuche, sondern ein weniger flexibles, sowie reißfesteres Material zu verwenden.
- Verkürzung der Ansprechzeit der UEG-Messung durch Auswahl eines alternativen Messverfahrens, um eine Verlängerung der Zuleitung zu vermeiden.

## 8. Literaturverzeichnis

Deutscher Wetterdienst, Daten der Wetterstation Tegel  
<http://www.dwd.de>; (abgerufen am 16.06.2014)

Erste allgemeine Verwaltungsvorschrift (technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) zum §48 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BimSchG) in der Fassung vom 24.06.2002 (Inkrafttreten am 01.10.2002), Abschnitt 4.2.1 und Abschnitt 5

KIWA-GmbH (MPA Berlin-Brandenburg), Bericht zur „Prüfungen zum Korrosionsverhalten von Membran-Plattenbelüfter-Elementen nach Einsatz im Belebungsbecken“ Bericht Nr. 13/793901, wissenschaftlicher Bearbeiter: Dipl.-Ing. Agnieszka Kowalczyk

Stolzenbach S., Bachelorarbeit: „Abluftbehandlung an einer Berliner Kläranlage mit erhöhtem Auftreten von Schwefelwasserstoff“, Universität Kassel, 2013

Weismann D. und Lohse M. (Hrsg.), „Sulfid-Praxishandbuch der Abwassertechnik“, Vulkan-Verlag GmbH, Essen, 2007

## 9. Anhang

### Anhang A Zulaufdaten

Datum	Uhrzeit	pH	T [°C]	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
29.07.	09:20	7,3	20,7		
31.07.	09:00	7,4	21,9		
31.07.	10:00				
01.08.	09:50	7,2	22		
21.08.	09:45	7,3	22		
22.08.	09:30	7,5	21		
27.08.	10:08	7,6	20,9		
28.08.	13:00	7,4	21,1		
29.08.	09:30	7,4	20,3		
03.09.	11:10	7,4	19,1	56	48
04.09.	11:30	7,6	19,5	73	52
05.09.	12:30	7,4	21,9	62	69
10.09.	13:15	7,4	19,6	268	71
11.09.	10:45	7,4	20,5	43,1	50
12.09.	10:30	7,3	19,4	70,6	53
17.09.	14:30	7,2	19,3	67	74
18.09.	13:30	7,2	19,3	69	51
20.09.	09:05	7,5	18,7	59	57
24.09.	08:38	7,3	20	57	65
25.09.	12:34	7,4	20	71	65
01.10.	09:05		18,7		
02.10.	11:52		18,9		
08.10.	11:00		18		
09.10.	10:15		19,7		
10.10.	12:27		20,5		
16.10.	14:05		21,5		
17.10.	14:05		19,9		
22.10.	10:15		17,6		
23.10.	13:05		19,4		
24.10.	11:02		20,1		
29.10.	09:20		19,6		
30.10.	14:30		19,7		
01.11.	12:15		19,1		

Datum	pH-Wert	Sulfid [mg/l]		
		gelöst	Leicht freisetzbar	gesamt
29.07.2013	7,3	<0,1		0,7
31.07.2013	7,4	0,4		4,0
01.08.2013	7,2	3,3		3,3
21.08.2013	7,3	<0,1		<0,1
22.08.2013	7,5	<0,1		<0,1
27.08.2013	7,6	<0,1		0,14
28.08.2013	7,4	<0,1		<0,1
29.08.2013	7,4	0,1		0,1
03.09.2013	7,4	<0,1	0,1	
04.09.2013	7,6	0,3	0,7	0,2
05.09.2013	7,4	<0,1	1,5	
10.09.2013	7,4	0,2	0,6	
17.09.2013	7,2	<0,1	<0,1	
18.09.2013	7,2	0,3	0,3	

#### Ergebnisse der Parallelbestimmung

		UCL			Wessling
Datum	Parameter				
08.10.	Sulfid gelöst	25	25	27	0,1
	Sulfid leicht freisetzbar	29	33	33	0,1
09.10.	Sulfid gelöst	32	29	31	0,2
	Sulfid leicht freisetzbar	32	33	36	0,4

## Anhang B Versuchsprogramm Mitbehandlung

KW	Datum	Uhrzeit	Versuch	Haube: Z0.1 - Sil		Haube: Z2.2 - TPU			Haube: Z2.3 - Sil			TPU Z2.4			Sil Z2.5			Haube: Z3.6 - TPU			Haube: Z3.7 - Sil			TPU Z3.8			Volumenstrom in Nm³/h
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
34	21.08.2013	11:06-12:06	Durchbruch/ Belüftertyp	X	X				X	X	X			X	X	X			X	X	X				1.8		
		12:25-13:55						X	X	X			X	X												4	
		14:05-15:35						X	X	X				X												5	
	Nachteinstellung*: alle TPU offen					X	X	X			X	X	X			X	X	X				X	X	X	1.8		
	22.08.2013	10:08-11:08	Durchbruch/ Belüftertyp			X	X	X			X	X	X			X	X	X				X	X	X	1.8		
11:44-13:15					X	X	X			X	X													4			
13:35-14:35					X	X	X			X															5		
Wocheendeinstellung: alle Silikon offen; Anlage vom 26.08. 09:30-27.08. 09:30 wegen Riss in Druckluftschlauch außer Betrieb				X	X				X	X	X			X	X	X			X	X	X				1.8		
35	27.08.2013	09:30	Neustart der Anlage																								
		11:38-12:53	mit HB**					X	X	X					X										5		
		13:10-13:47	ohne HB					X	X	X					X										5		
	Nachteinstellung					X	X	X			X	X	X			X	X	X			X	X	X				
	Anlage wegen Nachbesserung an den Hauben (Entfernung der Kondensatsäcke außer Betrieb)																										
	28.08.2013	13:40-15:15	Zone	X	X			X												X	X	X			5.7		
		15:20-16:50						X?																	5.7		
	Anlage vor Ende der Messzeit ausgefallen																										
	Nachteinstellung			X	X			X	X	X			X	X	X			X	X	X				1.8			
	29.08.2013	Anlage wegen UEG außer Betrieb																							6.7		
30.08.2013	07:45	Anlage wieder in Betrieb																					8				
Wocheendeinstellung ab 10:00								X	X	X			X	X										4			
36	31.08.2013 14:40 erneute Abschaltung																										
	03.09.	Anlage immernoch außer Betrieb																									
	04.09.2013	09:45	Dauerhafte Verringerung					X	X	X			X	X										4			
				Nachteinstellung					X	X	X			X	X										4		
	05.09.2013	08:00-09:45	Durchbruch	X	X																			8			
		09:45-10:45	Olfaktometrie, ohne HB					X	X	X			X											5			
	10:45-13:15	Olfaktometrie, ohne HB	X															X	X	X			5.3				
13:15 Wocheendeinstellung: alle TPU offen						X	X	X			X	X	X			X	X	X			X	X	X	1.8			

\*wird für die Nachteinstellung keine Uhrzeit angegeben erfolgte die Umstellung direkt nach dem letzten Versuch, gleiches gilt für die Wocheendeinstellung

\*\*mit/ ohne HB: Hauptbelüftung in der entsprechenden Zone von der Warte an oder abgestellt

KW	Datum	Uhrzeit	Versuch	Haube: Z0.1 - Sil		Haube: Z2.2 - TPU			Haube: Z2.3 - Sil			TPU Z2.4			Sil Z2.5			Haube: Z3.6 - TPU			Haube: Z3.7 - Sil			TPU Z3.8			Volumenstrom in Nm³/h	
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23		
37	10.09.2013	10:30-12:30	Durchbruch/ HB über HK* reduziert, Haube 2.2 defekt																									
		12:50-13:30	s.o.			X	X	X									X	X	X								6.7	
	Nachteinstellung			X	X				X	X	X								X	X	X					2.5		
11.09.2013	10:00-10:38	Querempfindlichkeit/																X	X	X						8		
	10:38-11:48	Substitution in	X	X																						8		
	12:05-12:30	Z0, HB über HK reduziert																X	X	X						8		
	12:30-13:25		X	X																						8		
Nachteinstellung															X	X	X					X	X	X		4		
12.09.2013	08:00-09:15	Olfaktometrie, ohne HB																X	X	X						8		
	09:15-10:30	Olfaktometrie, ohne HB	X	X															X							6		
	10:30-15:00														X	X	X									8		
ab 15:30 Wochenendeinstellung															X	X	X					X	X			4.8		
38	17.09.2013	10:10-10:50	Substitution, ohne HB															X	X	X						8		
		11:00-11:45				X	X	X																			6	
	ab 14:00 Nachteinstellung																	X	X	X				X	X		4.8	
	18.09.2013	10:53-13:30																			X	X	X				8	
	ab 14:00 Nachteinstellung					X	X	X			X																	5
	20.09.2013	ca. 09:15	Regelung der HB über HK --> Substitution für BUB			X	X														X	X	X					
Wochenendbetrieb																	X	X	X				X	X			4.8	
39	24.09.2013	09:00-10:15																		X	X	X					8	
		10:15-11:45		X	X																						8	
	Nachteinstellung					X	X	X			X																	5
	25.09.2013	13:20-14:45	Anlage für Reparatur der Haube in Z0 außer Betrieb			X	X	X																			6.7	
	Nachteinstellung					X	X	X			X																	5
27.09.2013	11:00	Anlage bis Montag außer Betrieb, da ein Kondensatablass vor dem Verdichter installiert wurde																										

\* Uhrzeiten nicht synchronisiert, Messung fand aber in der Zeit der Einstellung unter Einhaltung der Zeiten zur Gleichgewichtseinstellung statt (s. Versuchsprogramm), im Zuge der Substitutionsversuche wurde z.T. auch die Hauptbelüftung ohne Abluft mit dem GA 5000 gemessen

\*\*Prüfröhrchen hatte aufgrund von starkem Regen Feuchtigkeit gezogen, daher nicht als Durchbruch eingestuft

KW	Datum	Uhrzeit	Versuch	Haube: Z0.1 - Sil		Haube: Z2.2 - TPU			Haube: Z2.3 - Sil			TPU Z2.4			Sil Z2.5			Haube: Z3.6 - TPU			Haube: Z3.7 - Sil			TPU Z3.8			Volumenstrom in Nm <sup>3</sup> /h		
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23			
40	01.10.2013	10:18-11:10	phasenweise Substitution/ Querempfindlichkeit in Z0						X	X	X															6.7			
		11:10-12:20		X	X																							8	
		12:20-13:42									X	X	X																6.7
		13:42-15:04		X	X																								8
	Nachteinstellung								X	X	X									X								5.2	
	02.10.2013	11:11-12:00	phasenweise Substitution/ Querempfindlichkeit in Z 3.7							X	X	X																6.7	
12:00-13:55																				X	X	X						8	
13:55-14:36										X	X	X																6.7	
14:36-15:45																				X	X	X						8	
Wocheendeinstellung								X											X	X	X						5.7		
41	08.10.2013	10:35-12:00	phasenweise Substitution/ Querempfindlichkeit in 0						X	X	X																6.7		
		12:00-13:35		X	X																							8	
		13:35-14:44									X	X	X																6.7
		14:44-15:50		X	X																								8
	Nachteinstellung								X	X	X									X								5.7	
	09.10.2013	09:50-10:57	phasenweise Substitution/ Querempfindlichkeit in 3.7							X	X	X																6.7	
		10:57-12:22																			X	X	X						8
		12:22-13:00									X	X	X																6.7
		13:00-13:35																			X	X	X						8
	Nachteinstellung								X											X	X	X						5.7	
10.10.2013	09:20-10:23	Substitution/ Querempfindlichkeit in 3.7							X	X	X																6.7		
	10:23-12:00																			X	X	X						8	
	12:00-12:50									X	X	X																6.7	
	12:50-14:10																			X	X	X						8	
Wocheendeinstellung			X	X				X																			5.7		
42	14.10.16:00-16.10.07:30 Anlage wegen Riss im Druckluftschlauch außer Betrieb																												
	16.10.2013	10:30-11:43	phasenweise Substitution in 2.3 und 2.5							X	X	X								X	X	X					8		
		11:43-12:32																			X	X	X					3.3	
		12:32-13:13																											8
		13:13-15:25									X	X	X								X	X	X					3.3	
	Nachteinstellung			X					X	X	X																	4.7	
	17.10.2013	09:50-11:11	phasenweise Substitution in 2.3 und 2.5, Schieber 7 defekt--> offen	X	X						X																	5.7	
		11:11-12:53									X	X	X								X	X	X					3.3	
		12:53-13:30		X	X							X																	5.7
		ab 13:30									X	X	X								X	X	X					3.3	
Nachteinstellung (ab 13:30)								X	X	X									X	X	X						3.3		
18.10.2013	Versuche wegen Regenwetter von der Warte abgebrochen																												
Wocheendeinstellung								X	X	X									X	X	X						3.3		

\* Uhrzeiten nicht synchronisiert, Messung fand aber in der Zeit der Einstellung unter Einhaltung der Zeiten zur Gleichgewichtseinstellung statt (s. Versuchsprogramm), im Zuge der Substitutionsversuche wurde z.T. auch die Hauptbelüftung ohne Abluft mit dem GA 5000 gemessen  
\*\*Prüfröhrchen hatte aufgrund von starkem Regen Feuchtigkeit gezogen, daher nicht als Durchbruch eingestuft

KW	Datum	Uhrzeit	Versuch	Haube: Z0.1 - Sil		Haube: Z2.2 - TPU			Haube: Z2.3 - Sil			TPU Z2.4			Sil Z2.5			Haube: Z3.6 - TPU			Haube: Z3.7 - Sil			TPU Z3.8			Volumenstrom in Nm³/h				
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23					
43	22.10.2013	09:45-10:05	direkte						X	X	X				X	X	X										3.3				
		10:05-11:15	Substitution/	X	X									X														5.7			
		11:15-11:30	Querempfind-											X	X	X												5			
		11:30-14:00	lichkeit in Z0	X	X									X														5.7			
	Nachteinstellung									X	X	X				X	X	X										3.3			
	23.10.2013	bis 15:00	direkte							X	X	X				X	X	X										3.3			
		15:00 - 15:35	Substitution/	X	X																							8			
		15:35 - 16:16	Querempfind-							X		X				X	X	X										4			
		16:16 - 17:00	lichkeit in Z0	X	X																							8			
	Nachteinstellung									X		X				X	X	X										4			
	24.10.2013	9:17 - 9:59	direkte Substitution/ Querempfind- lichkeit in Z0	X	X																							8			
		9:59 - 10:46							X		X					X	X	X										4			
10:46 - 11:37		X		X																							8				
11:37 - 12:25								X		X					X	X	X										4				
12:25 - 14:30		X		X																								8			
Wocheendeinstellung						X	X	X				X	X	X				X	X	X			X	X	X		1.8				
44	29.10.2013	12:06 - 12:30	phasenweise			X	X	X				X	X	X													3.3				
		12:30 - 13:25	Substitution in															X	X	X			X	X	X		4				
		13:25 - 14:15	Zone 3.6 und			X	X	X					X	X	X													3.3			
		14:15 - 15:17	3.8															X	X	X			X	X	X		4				
	Nachteinstellung						X	X	X				X	X	X				X	X	X			X	X	X		1.8			
	30.10.2013	13:08 - 14:00	direkte															X	X	X			X	X	X		4				
		14:00 - 14:55	Substitution in			X	X	X					X	X	X													3.3			
		15:03 - 15:58	Zone 3.6 und															X	X	X			X	X	X		4				
	Nachteinstellung																	X	X	X			X	X				4.8			
	01.11.2013	12:10-12:58	direkte			X	X	X					X	X	X													3.3			
12:58-14:27		Substitution in Zone 3.6 und 3.8	versuch wegen stark schwankender Zulaufbedingungen abgebrochen																					X	X	X			X	X	X
Wocheendeinstellung bis 06.11.2013				X	X				X																			5.7			

\* Uhrzeiten nicht synchronisiert, Messung fand aber in der Zeit der Einstellung unter Einhaltung der Zeiten zur Gleichgewichtseinstellung statt (s. Versuchsprogramm), im Zuge der Substitutionsversuche wurde z.T. auch die Hauptbelüftung ohne Abluft mit dem GA 5000 gemessen

\*\*Prüfröhrchen hatte aufgrund von starkem Regen Feuchtigkeit gezogen, daher nicht als Durchbruch eingestuft

## Anhang C Roh-und Reingas Mitbehandlung

				Rohgas				Reingas			
Datum	Uhrzeit	Zone	V in Nm <sup>3</sup> /h	H <sub>2</sub> S Prüfröhrchen	H <sub>2</sub> S GA 5000	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S Prüfröhrchen	H <sub>2</sub> S GA 5000	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
21.08.	12:06	2.3	1,8	1200	980			0	0		
	13:55	2.3	4,0	1200	965			0	0		
	15:35	2.3	5,0	900	795			0	0		
22.08.	11:16*	2.2	1,8	1540	1600			0	0		
	13:07	2.2	4,0	1200	1150			0	0		
	14:23	2.2	5,0	850	935			0	0		
27.08.	12:40	2.3	5,0	1200	800			0	0	4	
	13:47	2.3	5,0	800	770			0	0	2	
28.08.	15:15	0.1	5,7	1100	1070			0	0		
04.09.	10:07	2.3	4,0								
	14:10		4,0	600	578	0,5	19,7	0	0	2,1	17,1
05.09.	09:15	0.1	8.0		755			0,1	0		
	10:00	2.3	5,0	400	587	0,5		0	0	2,2	
	11:30	3.7	5,3	500				0	0	1	
10.09.2013	12:50*	3.6	8,0					0	0	1	19,4
	15:30		8.0	700							
11.09.	10:33	3.7	6,7						0	2,2	18,5
	11:45	0.1	8.0					0	0	2,1	18,4
	11:50			300	215						
	12:30	3.7	8.0						0	2,2	18,4
	13:40	0.1	8.0						0	2	18,5
	13:50			200	185						
12.09.	09:15				565						
	09:35			800							
	09:38	0.1	<b>6.0</b>					0,1	0	2,1	18,3

\* Uhrzeiten nicht synchronisiert, Messung fand aber in der Zeit der Einstellung unter Einhaltung der Zeiten zur Gleichgewichtseinstellung statt (s. Versuchsprogramm), im Zuge der Substitutionsversuche wurde z.T. auch die Hauptbelüftung ohne Abluft mit dem GA 5000 gemessen

\*\*Prüfröhrchen hatte aufgrund von starkem Regen Feuchtigkeit gezogen, daher nicht als Durchbruch eingestuft

	10:15*	3.6	8.0						0	2,6	16,7
	10:50			1000	734						
17.09.	10:25			800	848						
	10:30	3.6						0	0	2,7	17
	11:34	2.2						0	0	2,6	16,9
	11:55			900	571					0,4	20
18.09.	12:24	0.1							0	2,2	19,1
	13:30			800	1200	1,2	20				
20.09.	11:35	0.1	8.0					0	0	2,4	18,2
	11:45		8.0	600	508	0,4	20,3				
	12:50			600				0			
24.09.	09:47	3.7						0	0	2,9	17,9
	11:05	0.1						(0,1)**	0	2,4	18,3
	11:20			1000	928						
25.09	14:30	2.2						0	0	2,6	18
	14:40			400	380						
01.10.	10:55	0.1							0	2,5	17,3
	11:05	2.3						0	0	2,7	17,6
	11:50	0.1						0	0	2,4	17,7
	12:10			1300	280	0,8	19,6				
	12:40	0.1							0	2,4	17,4
	12:45	DN 100		900							
	13:07	2.3						0	0	2,4	18,4
	14:15	0.1						0	0	2,4	17,6
	14:46	0.1							0	2,4	17,3
	15:10			1000	841	0,7	19,7				
02.10.	11:11	3.7							0	2,4	18,3
	11:52	2.3						0	0	2,6	18,2
	13:17	3.7						0	0	2,8	17,4
	13:50			600	485	0,5	20				
	13:52	DN100		600							
	14:36	3.7							0	2,4	17,4

\* Uhrzeiten nicht synchronisiert, Messung fand aber in der Zeit der Einstellung unter Einhaltung der Zeiten zur Gleichgewichtseinstellung statt (s. Versuchsprogramm), im Zuge der Substitutionsversuche wurde z.T. auch die Hauptbelüftung ohne Abluft mit dem GA 5000 gemessen

\*\*Prüfröhrchen hatte aufgrund von starkem Regen Feuchtigkeit gezogen, daher nicht als Durchbruch eingestuft

	14:40*	2.3						0	0	2,5	18,2
	15:39	3.7						0	0	2,5	18,6
	15:45			600	590	0,7	20,4				
08.10.	11:28	2.3							0	2,5	17,6
	11:33	0.1							0	2,3	18,2
	13:20			1200	1052	1	19,8				
	13:25	DN100		1200							
	13:30	0.1						0	0	2,3	17
	14:33	2.3							0	2,6	17,3
	14:39	0.1							0	2	18,3
	15:40			1000	927	0,9	20				
	15:50	0.1						0	0	2,1	17,5
09.10.	09:47*	3.7							0	2	18
	10:00	2.3							0	1,9	18,1
	11:52			1200	1085						
	11:52	DN100		1200							
	12:11	3.7						0	0	2,5	16,7
	12:48	2.3							0	2,5	17,9
	13:27	3.7						0	0	2,6	17,1
	13:40			1400	1352	1,1	19,2				
10.10.	09:45	2.3								2,8	17,5
	09:50	3.7								2,5	17,2
	11:23			1800	1587	1,5	20				
	11:28	DN100		1600							
	11:28	3.7							0	3	16,7
	12:40	2.3							0	2,8	17,7
	12:45	3.7							0	3	15,9
	13:40	3.7						0	0	2,8	16,9
	13:55			1200	1072	1	20				
16.10.	11:37	3.7						0	0	2,5	18,1
	12:00			600	504	0,6	20,7				
	12:30	2.3						0	0	2,7	18,4

\* Uhrzeiten nicht synchronisiert, Messung fand aber in der Zeit der Einstellung unter Einhaltung der Zeiten zur Gleichgewichtseinstellung statt (s. Versuchsprogramm), im Zuge der Substitutionsversuche wurde z.T. auch die Hauptbelüftung ohne Abluft mit dem GA 5000 gemessen

\*\*Prüfröhrchen hatte aufgrund von starkem Regen Feuchtigkeit gezogen, daher nicht als Durchbruch eingestuft

	13:11	3.7						0	0	2,6	18,6
	13:28			500	438	0,6	20,3				
	13:45	2.3						0	0	2,6	18,5
17.10.	10:10	0.1							0	2,9	17,4
	10:59				531	0,6	20,4				
	11:48	2.3						0	0	3	17,5
22.10.	10:00	0.1							0	2,5	17,6
	10:30								0	2,3	18,2
	10:35				856	0,8	19,9				
	13:27								0	2,2	18,1
	14:00								0	2,2	18
	14:05				307	0,7	20				
23.10.	12:59	0.1							0	2,1	17,7
	15:20	0.1							0	2,2	17,9
	15:23				755	0,7	19,7				
	16:15	0.1							0	2,1	17,5
	16:54								0	2	18,6
	17:00				419	0,4	20,6				
24.10.	09:15	0.1							0	2,3	17,8
	09:55	0.1							0	2,6	18,2
	09:58				1113	0,9	19,5				
	10:45	0.1							0	2,4	17,1
	11:26	0.1							0	2,5	18,1
	11:30				1266	1,3	19,5				
	12:18	0.1							0	2,6	17,4
	13:05				1061	0,9	19,8				
	13:10	0.1							0	2,3	17,8
29.10.	13:23	3.6							0	2,8	17
	13:32			600	483	0,5	20,1				
30.10.	14:30			600	570	0,6	20,4				
	15:43			600	613	0,7	20,4				
	15:45	3.6							0	2,8	17,9

\* Uhrzeiten nicht synchronisiert, Messung fand aber in der Zeit der Einstellung unter Einhaltung der Zeiten zur Gleichgewichtseinstellung statt (s. Versuchsprogramm), im Zuge der Substitutionsversuche wurde z.T. auch die Hauptbelüftung ohne Abluft mit dem GA 5000 gemessen

\*\*Prüfröhrchen hatte aufgrund von starkem Regen Feuchtigkeit gezogen, daher nicht als Durchbruch eingestuft

01.11.	14:01	3.6							0	2,8	18,2
	14:08			800	600	0,7	20,1				

\* Uhrzeiten nicht synchronisiert, Messung fand aber in der Zeit der Einstellung unter Einhaltung der Zeiten zur Gleichgewichtseinstellung statt (s. Versuchsprogramm), im Zuge der Substitutionsversuche wurde z.T. auch die Hauptbelüftung ohne Abluft mit dem GA 5000 gemessen

\*\*Prüfröhrchen hatte aufgrund von starkem Regen Feuchtigkeit gezogen, daher nicht als Durchbruch eingestuft

## Anhang D Druckverlust der Silikon und TPU Belüfter

Alle Belüfter wurden auf dem BWB Prüfstand bei einer Temperatur von 15 °C und mit einer Wassersäule von 192 cm getestet, Pstat: hydrostatischer Druck der Wassersäule, Pges: Gesamtdruck, Pv: Druckverlust

Volumenstrom [m <sup>3</sup> /h]		1		2		3		4		5		6		7	
Pstat [bar]	Belüfter- strang	Pges [bar]	Pv [bar]	Pges [bar]	Pv [bar]	Pges [bar]	Pv [bar]	Pges [bar]	Pv [bar]	Pges [bar]	Pv [bar]	Pges [bar]	Pv [bar]	Pges [bar]	Pv [bar]
0,188	Si Neu	0,212	0,024	0,214	0,026	0,218	0,03	0,224	0,036	0,228	0,04	0,234	0,046	0,24	0,052
0,188	Si 01	0,214	0,026	0,218	0,03	0,222	0,034	0,226	0,038	0,23	0,042	0,233	0,045	0,237	0,049
0,188	Si 02	0,219	0,031	0,226	0,038	0,232	0,044	0,237	0,049	0,244	0,056	0,249	0,061	0,256	0,068
0,188	Si 06	0,22	0,032	0,226	0,038	0,231	0,043	0,236	0,048	0,242	0,054	0,246	0,058	0,252	0,064
0,188	Si 07	0,228	0,04	0,232	0,044	0,237	0,049	0,242	0,054	0,247	0,059	0,252	0,064	0,258	0,07
0,188	Si 08	0,227	0,039	0,235	0,047	0,242	0,054	0,248	0,06	0,253	0,065	0,259	0,071	0,265	0,077
0,188	Si 12	0,219	0,031	0,224	0,036	0,229	0,041	0,233	0,045	0,238	0,05	0,243	0,055	0,248	0,06
0,188	Si 13	0,215	0,027	0,22	0,032	0,226	0,038	0,232	0,044	0,238	0,05	0,246	0,058	0,252	0,064
0,188	Si 14	0,212	0,024	0,224	0,036	0,228	0,04	0,234	0,046	0,238	0,05	0,245	0,057	0,25	0,062
0,188	Si 18	0,222	0,034	0,228	0,04	0,232	0,044	0,238	0,05	0,244	0,056	0,25	0,062	0,256	0,068
0,188	Si 19	0,22	0,032	0,226	0,038	0,231	0,043	0,237	0,049	0,244	0,056	0,252	0,064	0,26	0,072
0,188	Si 20	0,23	0,042	0,238	0,05	0,245	0,057	0,252	0,064	0,258	0,07	0,266	0,078	0,272	0,084

Volumenstrom [m <sup>3</sup> /h]		1		2		3		4		5		6		7	
Pstat [bar]	Belüfter- strang	Pges [bar]	Pv [bar]	Pges [bar]	Pv [bar]	Pges [bar]	Pv [bar]	Pges [bar]	Pv [bar]	Pges [bar]	Pv [bar]	Pges [bar]	Pv [bar]	Pges [bar]	Pv [bar]
0,188	TPU Neu	0,205	0,017	0,208	0,02	0,211	0,023	0,214	0,026	0,217	0,029	0,22	0,032	0,223	0,035
0,188	TPU 03	0,207	0,019	0,21	0,022	0,213	0,025	0,216	0,028	0,218	0,03	0,22	0,032	0,222	0,034
0,188	TPU 04	0,211	0,023	0,216	0,028	0,22	0,032	0,222	0,034	0,224	0,036	0,226	0,038	0,229	0,041
0,188	TPU 05	0,214	0,026	0,222	0,034	0,226	0,038	0,23	0,042	0,232	0,044	0,235	0,047	0,238	0,05
0,188	TPU 09	0,213	0,025	0,218	0,03	0,221	0,033	0,224	0,036	0,226	0,038	0,228	0,04	0,23	0,042
0,188	TPU 10	0,206	0,018	0,209	0,021	0,212	0,024	0,214	0,026	0,216	0,028	0,218	0,03	0,22	0,032

0,188	TPU 11	0,212	0,024	0,216	0,028	0,219	0,031	0,222	0,034	0,224	0,036	0,226	0,038	0,228	0,04
0,188	TPU 15	0,22	0,032	0,224	0,036	0,226	0,038	0,229	0,041	0,231	0,043	0,233	0,045	0,236	0,048
0,188	TPU 16	0,224	0,036	0,23	0,042	0,234	0,046	0,236	0,048	0,24	0,052	0,242	0,054	0,245	0,057
0,188	TPU 17	0,212	0,024	0,216	0,028	0,22	0,032	0,222	0,034	0,225	0,037	0,227	0,039	0,229	0,041
0,188	TPU 21	0,21	0,022	0,215	0,027	0,219	0,031	0,222	0,034	0,224	0,036	0,226	0,038	0,228	0,04
0,188	TPU 22	0,217	0,029	0,222	0,034	0,224	0,036	0,227	0,039	0,23	0,042	0,232	0,044	0,234	0,046
0,188	TPU 23	0,21	0,022	0,214	0,026	0,218	0,03	0,22	0,032	0,222	0,034	0,224	0,036	0,227	0,039

## Anhang E Daten der Kondesatanalyse

Datum	Uhrzeit	PN-Ort	T [°C]	pH	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> [mg/L]	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> [mg/L]	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg/L]	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> [mg/L]	CSB [mg/L]	CSB* 1 Nacht [mg/L]	CSB* 2 Nächte [mg/L]
21.08.	12:06	Belüfterharken	22,3	7,2							
22.08.	11:16	Belüfterharken	22,7	6,8							
27.08.	11:00	Belüfterharken	20,1	1,9							
28.08.	13:00	Belüfterharken	23,4	1,5							
04.09.	10:07	keine Kondesatmessung wegen Anlagenausfall									
05.09.	09:00	Belüfterharken	21,4	2,9	424	56	2,1	<0,05	214	166	
	12:15	Zuleitung	27,4	7,3	118	59	0,47	0,32	474	485	
10.09.	11:00	Zuleitung	13,6	7	59,4	66	0,38	0,49	435	442	436
	11:30	Belüfterharken	18,1	3,2	201	76	<0,3	<0,05	412	411	413
11.09.	10:00	Zuleitung	17,8	7,24							
	10:00	Belüfterharken	17,9	7,2							
12.09.	09:00	Belüfterharken	16,9	6,06	26,8	23	<0,30	0,15	189		
	12:45	Zuleitung	19,4	7,02	107	66	0,49	0,35	496		
17.09.	11:15	Zuleitung	16,5	6,91	52	33	>0,30	0,32	189	178	
	11:15	Belüfterharken	15,7	3,24	152	99	1,4	>0,050	899	869	
20.09.	09:25	Zuleitung			16	17	<0,30	0,3	157		
24.09.	ca. 09:00	Belüfterharken		neutral	471	120	1,6	<0,050	823		
	14:05			3-4**							
17.10.	10:15			4**							

\*Schwefelwasserstoff wird beim CSB Küvettentest miterfasst, daher wurde die Proben zum Vergleich ein bzw. zwei Nächte unter dem Abzug stehen gelassen, damit der Schwefelwasserstoff ausgast

\*\*Standzeit in den Belüfterharken seit dem 01.10.2013

**Anhang F Biozönose (die Biozönosedaten der anderen Linien, sowie die Daten aus 2012 sind auf der beiliegenden CD gespeichert)**

Datum	Linie	ISV	Katalase	TS	Ammoniumoxidierer	Nitritoxidierer	Fädigkeit
[-]	[-]	[ml/g]	[g H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /g oTS min]	[g/l]	[-]	[-]	[-]
27.08.2013	3.2	55	0,205	3,1	5	3	1-2
27.08.2013	4.1	48	0,176	4,1	5	2-3	1-2
10.09.2013	3.2	54	0,192	3,7	5	3	1-2
10.09.2013	4.1	47	0,209	3,2	5	3-4	1-2
24.09.2013	3.2	57	0,198	3,7	5	4-5	1-2
24.09.2013	4.2	50	0,184	3,8	5	4	1-2
08.10.2013	3.2	64	0,196	4,7	5	3	2
08.10.2013	4.2	53	0,176	4,0	5	3	2
23.10.2013	3.2	64	0,214	3,8	5	3-4	2
23.10.2013	4.1	54	0,216	3,5	5	3-4	2
06.11.2013	3.2	72	0,208	3,6	5	4	2-3
06.11.2013	4.1	57	0,204	3,7	5	4	2-3

Datum	Linie	Dominanz	Typ 0092	Microthrix parv.	Typ 0041	Nostocoida	Haliscomenobacter	Typ 021N	Schwefelbakt.
[-]	[-]	[-]	Häufigkeitsstufen (Abundanz) 1 bis 7 für alle Fadenbakterien						
27.08.2013	3.2	Microthrix, Typ0092	3	3	2	1	1	0	0
27.08.2013	4.1	Microthrix, Typ0093	3	3	2	1	1	0	0
10.09.2013	3.2	Microthrix parv.	3	4	2	1	1	0	0
10.09.2013	4.1	Microthrix parv.	3	4	2	1	1	0	0
24.09.2013	3.2	Microthrix parv.	3	4	2	1	1	0	0
24.09.2013	4.2	Microthrix parv.	3	4	2	1	1	0	0
08.10.2013	3.2	Microthrix parv.	3	5	2	1	1	0	0
08.10.2013	4.2	Microthrix parv.	3	4	2	1	1	0	0
23.10.2013	3.2	Microthrix parv.	4	5	2	1	1	0	0

23.10.2013	4.1	Microthrix parv.	4	5	2	1	1	0	0
06.11.2013	3.2	Microthrix parv.	4	6	2	1	1	0	0
06.11.2013	4.1	Microthrix parv.	4	6	2	1	1	0	0

## Anhang G Ergebnisse der olfaktometrischen Messungen

Datum	Uhrzeit (Beginn PN)	Messstelle	Volumenstrom Abluft	Geruchsstoff- Konzentration	Intensität	Hedonik	Art
			[Nm³/h]	[GE/m³]			
29.07.2013	09:35	Rohgas B		38968	sehr stark	unangenehm	stechend, H <sub>2</sub> S-typisch, abwassertypisch
	10:10	Rohgas B		32768	sehr stark	unangenehm	stechend, H <sub>2</sub> S-typisch, abwassertypisch
	09:35	Reingas 2		7732	deutlich	unangenehm	stechend, H <sub>2</sub> S-typisch, abwassertypisch
	10:10	Reingas 2		3251	deutlich	unangenehm	stechend, H <sub>2</sub> S-typisch, abwassertypisch
05.09.2013	09:42	Rohgas A		87480	extrem stark	unangenehm	stechend, H <sub>2</sub> S-typisch, abwassertypisch
	10:55	Rohgas A		61858	extrem stark	unangenehm	stechend, H <sub>2</sub> S-typisch, abwassertypisch
	08:32	Z 2.3	ohne Abluft	29	schwach	weder/noch	leicht abwassertypisch niedrig
	09:04	Z 2.3	ohne Abluft	27	schwach	weder/noch	leicht abwassertypisch niedrig
	09:40	Z 2.3	5	102	schwach bis deutlich	weder/noch	leicht abwassertypisch niedrig
	10:12	Z 2.3	5	76	schwach bis deutlich	weder/noch	leicht abwassertypisch niedrig
	09:35	Z3.7	ohne Abluft	16	schwach	weder/noch	leicht abwassertypisch niedrig
	10:07	Z3.7	ohne Abluft	21	schwach	weder/noch	leicht abwassertypisch niedrig
	10:50	Z3.7	5,3	40	schwach	weder/noch	leicht abwassertypisch niedrig

\*Messbereich überschritten

\*\*nur ein halber statt ein Pumpenhub, da sonst der Messbereich überschritten wurde

	11:22	Z3.7	5,3	34	schwach	weder/noch	leicht abwassertypisch modrig
12.09.2013	09:27	Rohgas A		61858	extrem stark	äußerst unangenehm	stechend, H <sub>2</sub> S-typisch, abwassertypisch
	10:37	Rohgas A		52016	extrem stark	äußerst unangenehm	stechend, H <sub>2</sub> S-typisch, abwassertypisch
	08:15	Z0	ohne Abluft	38	schwach	weder/noch	leicht abwassertypisch modrig
	08:46	Z0	ohne Abluft	40	schwach	weder/noch	leicht abwassertypisch modrig
	09:25	Z0	6	406	deutlich	weder/noch	abwassertypisch modrig
	09:57	Z0	6	431	deutlich	weder/noch	abwassertypisch modrig
	09:18	Z3.6	ohne Abluft	16	kein Geruch		
	09:58	Z3.6	ohne Abluft	18	kein Geruch		
	10:35	Z3.6	8	43	schwach	weder/noch	leicht abwassertypisch erdig
	11:07	Z3.6	8	48	schwach	weder/noch	leicht abwassertypisch erdig
24.09.2013	08:45	Rohgas B		165140	sehr stark	unangenehm	stechend, H <sub>2</sub> S-typisch, abwassertypisch
	10:31	Rohgas B		155872	sehr stark	unangenehm	stechend, H <sub>2</sub> S-typisch, abwassertypisch
	08:46	Reingas 1		55109	sehr stark	unangenehm	H <sub>2</sub> S-typisch, abwassertypisch
	09:18	Reingas 1		73562	sehr stark	unangenehm	H <sub>2</sub> S-typisch, abwassertypisch
	08:47	Reingas 3		9742	weder/noch	unangenehm	ozonartig, abwassertypisch
	09:19	Reingas 3		9742	weder/noch	unangenehm	ozonartig, abwassertypisch
	09:05	Z0	ohne Abluft	362	schwach	weder/noch	belebungstypisch
	09:37	Z0	ohne Abluft	342	schwach	weder/noch	belebungstypisch
	10:30	Z0	8	287	schwach	weder/noch	belebungstypisch

\*Messbereich überschritten

\*\*nur ein halber statt ein Pumpenhub, da sonst der Messbereich überschritten wurde

	11:02	Z0	8	362	schwach	weder/noch	belegungstypisch
--	-------	----	---	-----	---------	------------	------------------

\*Messbereich überschritten

\*\*nur ein halber statt ein Pumpenhub, da sonst der Messbereich überschritten wurde

## Anhang H Roh- und Reingas UV-Anlage

Datum	Uhrzeit	Rohgas		Reingas 1 vor KAT			
		H <sub>2</sub> S Prüf- röhrchen	H <sub>2</sub> S GA 5000	H <sub>2</sub> S Prüf- röhrchen	H <sub>2</sub> S GA 5000	SO <sub>2</sub> Prüf- röhrchen	O <sub>3</sub> Prüfröhrchen
29.07.	09:40	600					
	09:50	500					
	10:15			200			
31.07.	10:00	300	272				
	10:30			100			
21.08.	12:36	1000	785	500	328	100	2
22.08.	12:33	1000	1020	450	520	90	2
27.08.	11:40	1150	1000	500	480	120	2,5
28.08.	15:15	1000	786	400	300	100	2
29.08.	14:00	700	930	400	482	40	1,5
02.09.	09:45		855		358		
03.09.	11:10	600	745	400	367	20	1,5
04.09.	11:00	500	402	200	233	20	2
05.09.	09:00	700	556	300	279	20	2
10.09.	11:45	500	439	200	253	20	3
11.09.	10:10	400	360	200	193		
12.09.	08:15	900	1177	400	512	20	2,5
17.09.	12:00	600	445	200	379	60	3*
18.09.	13:45	750	780	400		60	3*
20.09.	11:25	600	441	300	158		
24.09.	10:00	1100	1122	600	512		
	12:00	900	933	400	432		
	13:25	800	841	400	417		
25.09	12:55	600	588	200	201		
	13:30	500	534	200	181		
	14:50	400	393	100	157		
01.10.	09:45	1400	1163	600	348	60	3

\*Messbereich überschritten

\*\*nur ein halber statt ein Pumpenhub, da sonst der Messbereich überschritten wurde

	11:30	1000	1099	600	575	60	3*
	14:25	1200	876	400	439	60	3*
02.10.	11:11	Wartung der UV-Anlage, daher keine Werte					
08.10.	09:50	800	797	300	308	100	
09.10.	11:30	1200	1150	400	335		
	12:45					90	
10.10.	14:10	1200	1138	300	333	40	
16.10.	11:00	600	584	120	177	80	
17.10.	10:05	800		80			
	10:20		638		50		
	10:59	500					
	11:30					40	
22.10.	10:40	1000					
	12:15	400					
	14:05	750					
23.10.	12:40	1000	1010				
	14:20	700	637				
	15:50	600	570				
	17:00	800	782				
24.10.	08:40	1500	1389	600			
	10:24	1200	1011				

Datum	Uhrzeit	Reingas 2 nach KAT				Reingas 3 Ende der Messreihe			
		H <sub>2</sub> S Prüfröhr- chen	H <sub>2</sub> S GA 5000	SO <sub>2</sub> Prüf- röhrchen	O <sub>3</sub> Prüfröhrchen	H <sub>2</sub> S Prüfröhr- chen	H <sub>2</sub> S GA 5000	SO <sub>2</sub> Prüf- röhrchen	O <sub>3</sub> Prüfröhrchen
25.07.	11:45	10							
	10:05	2,5							
	10:06	3		0,25					
31.07.	10:00								
	10:15	<10	4						
21.08.	12:36	0	22	20	0				

\*Messbereich überschritten

\*\*nur ein halber statt ein Pumpenhub, da sonst der Messbereich überschritten wurde

22.08.	12:33	0	0	40	0				
27.08.	11:40	100	85	120	0				
28.08.	15:15	150	92	100	0				
29.08.	14:00	300	341	40	0				
02.09.	09:45		287						
03.09.	11:10	400	325	20	0				
04.09.	11:00	200	214	20	0				
05.09.	09:00	200	279	20	0				
10.09.	11:45	200	223						
11.09.	10:10	150	157						
12.09.	08:15	400	383						
17.09.	12:00	160	129			140			
18.09.	13:45	300	315	60		300			
20.09.	11:25	200	158	50	3	160	170		
24.09.	10:00	500	487			500	446		
	12:00	400	421			400	411		
	13:25	400	375			400	380		
25.09	12:55	200	199			200	165		
	13:30	200	192			200	194		
	14:50	100	153			200	159		
01.10.	09:45	400	417	50	3*	400	355	50	3*
	11:30	400	438	60	3*	500	467	50	2,8
	14:25	300	338	60	3*	400	329	50	3*
02.10.	11:11								
08.10.	09:50	300	286			300	283	100	3*
09.10.	11:30	300	295			400	288		
	12:45							80	3*
10.10.	14:10	300	330			300	297	40	3*
16.10	11:00	160	136			180	184	70	3*
17.10.	10:05	60				60			
	10:20		41				42		
	10:59					20			

\*Messbereich überschritten

\*\*nur ein halber statt ein Pumpenhub, da sonst der Messbereich überschritten wurde

	11:30							40	3*
22.10.	10:40					400		80	3*
	12:15					200		80	3*
	14:05					300		90	3*
23.10.	12:40					600	493	80	3**
	14:20					300	173	80	4**
	15:50					200	295	80	4**
	17:00					400	420	80	5**
24.10.	08:40	600				600	593	100	2,5
	10:24					600	533	100	3**

\*Messbereich überschritten

\*\*nur ein halber statt ein Pumpenhub, da sonst der Messbereich überschritten wurde

## Anhang I Feststoffanalyse UV-Anlage

Die Probe wurde durch Abwischen von drei Strahern drei Papiertüchern genommen, die Papiertücher schwanken in ihrer Zusammensetzung, daher der erhöhte Blindwert

12.09.2013	Analyse des Belages auf den Lampen	
Parameter	Blindwert Papiertuch in mg/kg	Menge von drei Papiertüchern mit Belag von 3 Lampen in mg/kg
Schwefel	100	130000
Eisen	45	12
Mangan	1.3	0.3
Calcium	890	230
Silicium	86	56
Kupfer	1	1.3
Magnesium	130	15

24.10.2013	Analyse des Pulvers, das sich in der UV-Anlage abgelagert hat
Parameter	Menge in mg/kg
Schwefel	270000
Eisen	250
Mangan	32
Calcium	46
Silicium	<150
Kupfer	320
Magnesium	160