

HST Hydro-Systemtechnik GmbH
Sophienweg 3
59872 Meschede

**Reinsauerstoffbelüftung auf kleinen Industriekläranlagen
- Energieeinsparpotenziale und Kapazitätssteigerungen am Beispiel
der Kläranlage der Fa. Emsland Frischgeflügel GmbH**

Abschlussbericht
gefördert unter dem Kennzeichen 26353-23 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dr.-Ing. Dr. rer. pol. Dr. h.c. Karl-Ulrich Rudolph,
Dipl.-Ing. Günther Müller-Czygan, Dipl.-Ing. Markus Bombeck

September 2012

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	II
Abkürzungsverzeichnis	III
1 Zusammenfassung	1
2 Einleitung	3
3 Grundlagen für die Verwendung von Reinsauerstoff in der Abwasserreinigung ...	5
3.1 Erzeugung von Reinsauerstoff.....	5
3.2 Eintragsysteme	8
3.3 Einflussparameter	11
3.4 Vorteile der Reinsauerstoffbelüftung.....	13
3.5 Anwendungsgebiete und Anwendungsgrenzen.....	14
4 Beschreibung der Pilotanlage	16
4.1 Kläranlage Haren	16
4.2 Pilotanlage	18
5 Messprogramm und Messergebnisse	21
5.1 Ziel	21
5.2 Auswahl der Parameter	21
5.3 Ergebnisse	22
6 Bewertung der Ergebnisse	27
6.1 Energieverbrauch.....	27
6.1.1 Industrielle Kläranlagen.....	27
6.1.2 Pilotanlage mit Luftsauerstoff und Reinsauerstoff im Vergleich.....	29
6.2 Reduzierung Reststoffanfall.....	31
6.3 Aerosol- und Geruchsemissionen.....	32
6.4 Klimaschädliche Emissionen.....	33
6.5 Leistungssteigerung und Prozessstabilität.....	33
6.6 Kosten.....	34
7 Ergebnisverwertung	36
7.1 Ziele	36
7.2 Marktanalyse und Markteinführung im Abwassersektor	36
7.3 Produktverbreitungsstrategie	40
7.4 Bericht über Maßnahmen zur Verbreitung der Projektergebnisse	41
7.5 Schlussfolgerungen und Maßnahmen	42
8 Fazit	43
Literaturverzeichnis	44

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Gastrennungsadsorptionsanlage (Quelle: AirProducts)	6
Abbildung 2:	Injektorprinzip (Halia® Venturi Aeration System for LOX installations, Quelle: AirProducts)	9
Abbildung 3:	Fließschema der Pilotanlage (nicht maßstäblich).....	16
Abbildung 4:	VSA-Anlage auf dem Gelände der Emsland Frischgeflügel GmbH in Haren (Ems).....	19
Abbildung 5:	CSB- und Gesamtstickstoff-Zulauftracht	23
Abbildung 6:	Beckenfüllstand und Schlammgehalt.....	23
Abbildung 7:	pH-Wert und Temperatur	24
Abbildung 8:	Schlammvolumenindex und gelöster Sauerstoff im Belebungsbecken I und II	24
Abbildung 9:	Stromverbrauch und mittlerer Tagesstromverbrauch während der Messkampagne	26
Abbildung 10:	CSB- und Stickstoff-Konzentration im Ablauf	26
Abbildung 11:	Mittlerer Stromverbrauch von Anlagenteilen in GK4 und 5 (Quelle: Haberkern et al., 2008).....	28
Abbildung 12:	Mikroskopische Aufnahme Belebungsbecken I (links) und II (rechts).....	31
Abbildung 13:	Schaumbildung bei konventioneller Belüftung (links) und Reinsauerstoffbegasung (rechts).....	32

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammensetzung der Luft (Quelle: Downie, 1997).....	5
Tabelle 2:	Sättigungskonzentrationen c_s [mg/l] von technisch reinem Sauerstoff in Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur und vom Druck (Quelle: ATV, 1985).....	12
Tabelle 3:	Anforderungen an das Abwasser für die Einleitungsstelle	18
Tabelle 4:	Beispielhafte Zusammensetzung verschiedener Industrieabwässer (Quelle: Böhnke et al., 1993).....	27
Tabelle 5:	Bewertung der möglichen Energieeinsparungen unter optimalen Einsatzbedingungen der VSA-Anlage	30

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Einheit	Beschreibung
a	m ⁻¹	spezifische Grenzfläche Wasser-Luft
A	m	gesamte Grenzfläche
AbwVO		Abwasserverordnung
Ar		Argon
Ba		Barium
BaO		Bariumoxid
BaO ₂		Bariumperoxid
BB		Belebungsbecken
BSB	mg/l	biochemischer Sauerstoffbedarf
BSB ₅	mg/l	biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen
c	kg/m ³	Sauerstoffkonzentration
CH ₄		Methan
CO ₂		Kohlendioxid
c _s	kg/m ³	Gleichgewichts-/Sättigungskonzentration
c _{s,st,20}	kg/m ³	Standard-Sauerstoffsättigungskonzentration bei 20°C
CSB	mg/l	chemischer Sauerstoffbedarf
D	m ² /h	Diffusionskoeffizient
EFG		Emsland Frischgeflügel GmbH
EW		Einwohnerwerte
FKW/PFC		Perfluorierte Kohlenwasserstoffe
H ₂ O		Wasser
H ₂ O ₂		Wasserstoffperoxid
He		Helium
HFKW/HFC		Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
k _l	m ⁻¹	Diffusionsgeschwindigkeit von O ₂ in Wasser
k _{l,a20}	m/h	Belüftungskoeffizient bei 20°C
Kr		Krypton
N ₂		Stickstoff
N ₂ O		Distickstoffoxid
Ne		Neon
N _{ges}	mg/l	Gesamtstickstoff
NH ₄ -N	mg/l	Ammoniumstickstoff
NKB		Nachklärbecken
O ₂		Sauerstoff
O ₃		Ozon
OC _R	kg/(m ³ ·h)	Sauerstoffeintrag in Reinwasser
P	kW	Leistungsaufnahme der Belüftungseinrichtung

Abkürzung	Einheit	Beschreibung
PE		Polyethylen
SF ₆		Schwefelhexafluorid
ISV	ml/g	Schlammvolumenindex
t _k	h	mittlere Existenzdauer der wasserseitigen Phasengrenzschicht
TS-Gehalt	mg/l	Trockensubstanzgehalt
ÜS		Überschussschlamm
V	m ³	Reaktionsvolumen
VKB		Vorklärbecken
VSA		Vakuumwechseladsorptionsanlage
Xe		Xenon
α	-	Grenzflächenfaktor
αSAE	kg/kWh	Standard-Sauerstofftrag
αSOTR	kg/h	Standard-Sauerstoffzufuhr
β	-	Salzfaktor

1 Zusammenfassung

Die HST Hydro-Systemtechnik GmbH ist als Anbieter von Produkten, Systemen und Lösungen im Bereich der Wasserwirtschaft als Innovationsführer bekannt und stetig bemüht, neue und innovative Lösungen für Probleme und Fragestellungen zu finden. Im Bereich der Abwasserreinigung bietet HST biologische Klärverfahren an. Zur Erweiterung des Lösungsportfolios beabsichtigte HST mit der Erprobung einer Versuchsanlage zur Vor-Ort-Erzeugung von Reinsauerstoff zu prüfen, ob diese als innovative und energieeffiziente Belüftungsvariante beschriebene Technik im Bereich der Kläranlagentechnik einsetzbar und als Bestandteil von HST-Lösungen kompatibel ist. Zu diesem Zweck wurde bei der DBU die Errichtung und ein 1-jähriger Probetrieb einer entsprechenden Versuchsanlage des Herstellers AirProducts beantragt und durch die DBU mit dem Förderkennzeichen 26353-23 genehmigt. Wissenschaftliche Begleitung für das Projekt erhielt HST durch das Institut für Umwelttechnik und Management an der privaten Universität Witten/Herdecke gGmbH.

In der für das Projekt ausgewählten Industriekläranlage der Emsland Frischflügel GmbH in Haren (Ems) im Landkreis Emsland existieren zwei parallele Reinigungsstraßen, bestehend aus Vorklärflotation, Belebungsbecken und Nachklärflotation. Mit Hilfe einer vor Ort installierten Vakuumwechseladsorptionsanlage (VSA) wurde die 2. Reinigungsstraße im Zuge der Projektlaufzeit mit Reinsauerstoff begast und während einer Messkampagne prozesstechnische Parameter mit der konventionell betriebenen 1. Reinigungsstraße verglichen. Während der Messkampagne vom 17.03.2011 bis 09.06.2011 betrug der Zufluss zur Kläranlage im 7-Tage-Mittel 2.865 m^3 , im Mittel lag dabei eine CSB-Konzentration im Zulauf des Belebungsbeckens von etwa 700 mg/l vor. Sämtliche Einleiterwerte wurden während des gesamten Versuchszeitraums eingehalten bzw. unterschritten.

Im Vergleich mit der konventionell belüfteten Anlage konnte aufgrund der folgenden Gründe keine signifikante Energieeinsparung realisiert werden:

1. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Ausstrippung von CO_2 war eine zusätzliche Belüftung der 2. Reinigungsstraße erforderlich. Die Eintragsenergie der eingesetzten Landiamischer reichte zur Ausstrippung nicht aus. Ohne diese Anpassung war die Prozessstabilität aufgrund der geringen Pufferkapazität des zu behandelnden Abwassers gefährdet. Trotz der zusätzlichen Belüftung lag der pH-Wert in Belebungsbecken II im Versuchszeitraum im Durchschnitt bei 6,58 und somit unterhalb des Optimalbereichs.
2. Die VSA-Anlage konnte wegen der intermittierenden Belüftung nicht im optimalen Betriebspunkt betrieben werden. Das stetige An- und Abfahren und das aus energetischer Sicht schlechte Teillastverhalten der Anlage führte zu einem höheren spezifischen Stromverbrauch je produzierter Einheit Sauerstoff als im Volllastbetrieb.

-
3. Die VSA-Anlage wurde nicht an den betriebsbedingt deutlich geringeren Sauerstoffbedarf an Wochenenden angepasst. So wurde unnötig viel Sauerstoff in das System eingetragen, was zu einem deutlich höheren Energieverbrauch im Vergleich zur konventionellen Anlage beigetragen hat.
 4. Der schwankende Beckenfüllstand, das resultierende geringere hydrostatische Druckniveau und die somit kürzere Verweilzeit der Gasblasen im System haben sich negativ auf den Sauerstoffeintrag ausgewirkt und zu einem ineffizienten Reinsauerstoffeintrag geführt.

Diese Bedingungen waren zum Zeitpunkt der Anlagenauswahl und Start des Projektes vor Ort nicht unmittelbar erkennbar und stellten sich erst nach bereits erfolgter Anlageninstallation und Start des Versuchsbetriebes heraus.

Die Überschussschlammengen der beiden Betriebsweisen konnten nicht getrennt erfasst werden, es wurde im Becken der Reinsauerstoffbegasung aber eine Bildung kleinerer und kompakterer Belebtschlammflocken sowie eine geringere Fädigkeit beobachtet, was auch durch Vergleich der Schlammvolumenindices bestätigt wurde. Durch den niedrigeren Schlammvolumenindex lässt sich das Belebungsbecken mit einem höheren Schlammgehalt betreiben. Da der Sauerstoffgehalt im Belebungsbecken mit Reinsauerstoffbegasung höher war und die Belebtschlammflocken kompakter, ist dort mit einer geringeren Geruchsstoffbildung zu rechnen. Bei Spitzenbelastungen wurde die Kapazität der VSA-Anlage zu lediglich etwa 90 % beansprucht, d.h. die seitens AirProducts zur Verfügung gestellte Anlage war auf den lokalen Fall nicht optimal anpassbar. Da im Vergleich zu der konventionellen Fahrweise keine Energieeinsparung realisiert werden konnte, ließen sich auf diesem Wege folglich auch keine klimaschädlichen Emissionen vermeiden. Dennoch kann festgehalten werden, dass die ermittelten Ergebnisse darauf hindeuten, dass der Einsatz von Reinsauerstoff eine Energie reduzierende Alternative darstellt, wenn die Rahmenbedingungen stimmen. Die Untersuchungen haben hierzu zahlreiche Hinweise gegeben, die bei zukünftigen Projekten zu beachten sind.

So ist zur Realisierung von Energieeinsparungen bei der Vor-Ort-Erzeugung von Reinsauerstoff für die Begasung von Abwasser in einer biologischen Abwasserreinigungsanlage darauf zu achten, dass das zu behandelnde Abwasser eine ausreichende Pufferkapazität bzw. einen hohen pH-Wert besitzt. Vorteilhaft ist die Ausführung der Nachklärung als Absetzbecken, um die Vorteile eines geringeren Schlammvolumenindex bei Reinsauerstoffbegasung und der daraus resultierenden begünstigten Absetzbarkeit der Belebtschlammflocken auszunutzen. Des Weiteren können Energieeinsparungen dann realisiert werden, wenn die Sauerstoffproduktion an den tatsächlichen Sauerstoffbedarf angepasst wird. Weiterhin ist es von Vorteil, ein Belebungsbecken ohne Füllstandsschwankungen zu begasen oder ein an die Schwankungen angepasstes Eintragungssystem zu verwenden.

2 Einleitung

Kläranlagen, die zur Abwasserreinigung biologische Verfahren wie z. B. das Belebungsverfahren nutzen, sind in entscheidendem Maße vom Eintrag von Sauerstoff in das Belebungsbecken abhängig, da dieser für den Abbau von unerwünschten Abwasserinhaltsstoffen benötigt wird. Dabei setzen konventionelle Eintragungssysteme auf die Verwendung des Luftsauerstoffs. Auf diese Weise wird unter hohem Energieaufwand nicht nur der etwa 21 prozentige Sauerstoffanteil der Luft eingebracht, sondern darüber hinaus der für die Abbauprozesse unbrauchbare Anteil der Luft, der zum größten Teil aus Stickstoff besteht. Die Belüftung stellt mit einem vom verwendeten Verfahren der Abwasserreinigung abhängigen Stromverbrauch zwischen 50 und 80 % des gesamten Strombedarfs einer Kläranlage den größten Energieverbraucher dar, womit ihre Bedeutung im Hinblick auf eine effiziente Betriebsweise deutlich wird (Haber Kern et al., 2008).

Im vorliegenden Abschlussbericht werden die Ergebnisse von Untersuchungen vorgestellt, die unternommen wurden, um Energieeinsparpotentiale durch die Verwendung von vor Ort erzeugtem Reinsauerstoff am Beispiel einer Pilotanlage zu untersuchen. Die Vorteile der Sauerstoffbegasung sind schon seit längerem bekannt und kommen ab den 70er Jahren auch in einigen, meist industriellen Anlagen zur Anwendung. Diese wurden bisher von großtechnischen Luftzerlegungsanlagen per Tankwagen mit Reinsauerstoff versorgt. Auf der ausgewählten Kläranlage in Haren (Ems) kam dagegen ein innovatives System zum Einsatz, bei dem Reinsauerstoff für die Sauerstoffversorgung einer biologischen Abwasserreinigungsanlage vor Ort erzeugt wird. Der Reinsauerstoff wird dabei in einer Gastrennungs-Adsorptionsanlage gewonnen und bietet daher auch für kleinere Kläranlagen Anwendungspotentiale. Die auf vergleichbaren Anlagen übliche Anlieferung von flüssigem Sauerstoff mit der zugehörigen Technikperipherie ist nicht erforderlich gewesen.

Im Vorfeld der Pilotversuche wurde eine Fragebogenaktion durchgeführt und ausgewertet, um eine geeignete Industriekläranlage für die Erprobung des innovativen Ansatzes zu finden. Die Auswahl und die anschließend geführten Gespräche führten dazu, dass sich HST und die Emsland Frischgeflügel GmbH in Haren (Ems) einigten, die Pilotversuche am Standort Haren (Ems) durchzuführen. Die Emsland Frischgeflügel GmbH hatte sich an der Fragebogenaktion beteiligt und war aufgrund geplanter Kläranlagenerweiterungen an einem innovativen Lösungsansatz interessiert. Im Projekt konnte daher die Auslegung, Beschaffung und Installation des geeigneten Aggregats mit der Konfiguration der Prozessleittechnik und des Betriebsführungssystems sowie dem Abgleich mit dem auf der ausgewählten Kläranlage bestehenden Prozessleitsystem auf der Kläranlage der Emsland Frischgeflügel GmbH in Haren (Ems) erfolgen. Für eine Messkampagne, in der wesentliche Betriebsparameter aufgezeichnet wurden, wurde die Parametrierung der Messtechnik und der Probenehmer mit allen beteiligten Parteien abgestimmt und die Versuchsanordnung für die wissenschaftlichen Begleituntersuchungen aufgebaut. Es folgten die Inbetriebnahme der Pilotanlage und der

Versuchsbetrieb mit begleitender Analyse der Untersuchungsergebnisse. In Kapitel 3 wird auf die Grundlagen für die Verwendung von Reinsauerstoff in der Abwasserreinigung eingegangen. Kapitel 4 beschreibt die für den Pilotbetrieb ausgewählten Anlagen und gibt einen kurzen Überblick über die Probleme im Zuge der Inbetriebnahme- und Betriebsphase bis ein stabiler Betrieb als Grundlage der vorgestellten Messergebnisse erreicht werden konnte. In Kapitel 5 wird das durchgeführte Messprogramm erläutert und dessen Ergebnisse vorgestellt, die in Kapitel 6 bewertet und diskutiert werden. In Kapitel 7 erfolgt die Ergebnisverwertung, Kapitel 8 enthält ein zusammenfassendes Fazit inklusive eines Ausblicks auf einen möglichen zukünftigen Forschungsbedarf.

3 Grundlagen für die Verwendung von Reinsauerstoff in der Abwasserreinigung

3.1 Erzeugung von Reinsauerstoff

Sauerstoff ist das am häufigsten vertretene Element auf der Erde. Elementar liegt Sauerstoff überwiegend in einer Verbindung aus zwei Sauerstoffatomen (O_2) vor und wird in dieser Form als molekularer Sauerstoff bezeichnet. Dieser ist ein farb-, geschmack- und geruchloses Gas und macht einen Volumenanteil von 20,95 % der Luft aus (Holleman und Wiberg, 2007). Weitere Hauptbestandteile der Luft sind Stickstoff mit 78,08 % und Argon mit 0,93 %. Die restlichen 0,04 % bestehen aus Kohlendioxid, Wasserstoff und den Edelgasen Neon, Helium, Krypton und Xenon (siehe Tabelle 1) sowie weiteren Bestandteilen. Neben dem Luftsauerstoff, den die meisten Lebewesen als Lebensgrundlage benötigen, ist Wasser (H_2O) zu nennen. Hier liegt der Sauerstoff jedoch chemisch gebunden vor, so wie in vielen organischen (z. B. Zucker, Eiweiß, Alkohol) und anorganischen Verbindungen (z. B. Minerale wie Silicate, Carbonate und Oxide).

Tabelle 1: Zusammensetzung der Luft (Quelle: Downie, 1997)

	Vol.-%	Siedepunkt
O_2	20,95	-183,0 °C
N_2	78,08	-195,8 °C
Ar	0,93	-185,9 °C
Ne	0,0018	-246,1 °C
He	0,0005	-268,9 °C
Kr	0,00011	-153,2 °C
Xe	0,000009	-108,0 °C

Zur Gewinnung von reinem Sauerstoff bietet sich am ehesten eine Separation aus der Luft an. Dabei liegen im Vergleich zu den chemischen Verbindungen des Sauerstoffs die geringsten Bindungskräfte vor. Folglich muss zur Abtrennung des Reinsauerstoffs die geringste Energie aufgewendet werden.

Auf diesem Gebiet haben sich im Wesentlichen zwei Verfahren durchgesetzt, die auf unterschiedlichen technischen Prozessen beruhen, zum einen das Gastrennungsadsorptionsverfahren und zum anderen das Tieftemperaturverfahren. Weniger verbreitete Verfahren beinhalten die Verwendung von keramischen Membranen, von der Elektrolyse und von chemischen Reaktionen, bei denen Sauerstoff freigesetzt wird.

Das Gastrennungsadsorptionsverfahren wird im Englischen als Vacuum-Swing-Adsorption- (VSA-) Verfahren bezeichnet. Es macht sich die Eigenschaft bestimmter Adsorptionsmittel zunutze, Gase an ihrer Oberfläche zu binden. Als poröse Adsorptionsoberfläche, auch als Molekularsieb bezeichnet, fungieren so genannte Zeolithe. Zeolithe sind Alumosilikate, die eine kristalline Struktur aufweisen. Sie kommen in der Natur vor, lassen sich aber auch synthetisch herstellen. Ihr Vorteil liegt in ihrer Hohlraumstruktur, die eine große Oberfläche bietet (Smarsly, 1995). In Abhängigkeit des anliegenden Drucks binden sie an ihrer Oberfläche Stickstoff um ein Vielfaches besser als Sauerstoff. Umgebungsluft wird zunächst komprimiert, durch einen Filter von Feuchtigkeit und Verunreinigungen befreit und in einen Behälter mit Zeolithfüllung geleitet. An der Zeolithfüllung adsorbiert der Stickstoff bei Erreichen eines bestimmten Druckes. Der Sauerstoff kann dann mit einer Reinheit von bis zu 93 % abgezogen werden. Die restlichen 7 % bestehen hauptsächlich aus Argon, das ein ähnliches Adsorptionsverhalten wie Sauerstoff aufweist und daher ebenfalls nicht an der Oberfläche der Zeolithfüllung adsorbiert wird. Der Adsorptionsprozess ist nur so lange möglich, bis die Beladungsgrenze des Zeolithen erreicht ist. Der Stickstoff muss dann in einer Entspannungsphase von der Molekularsieboberfläche desorbiert werden. Um diesen Prozess zu beschleunigen, wird bei einigen Anwendungen ein Vakuum erzeugt. Zum Ende der Regenerationsphase wird ein Teil des Produktgases in den zu reinigenden Adsorber geleitet, um die Desorption der Gasmoleküle zu beschleunigen. Im Anschluss kann ein neuer Adsorptionszyklus beginnen.

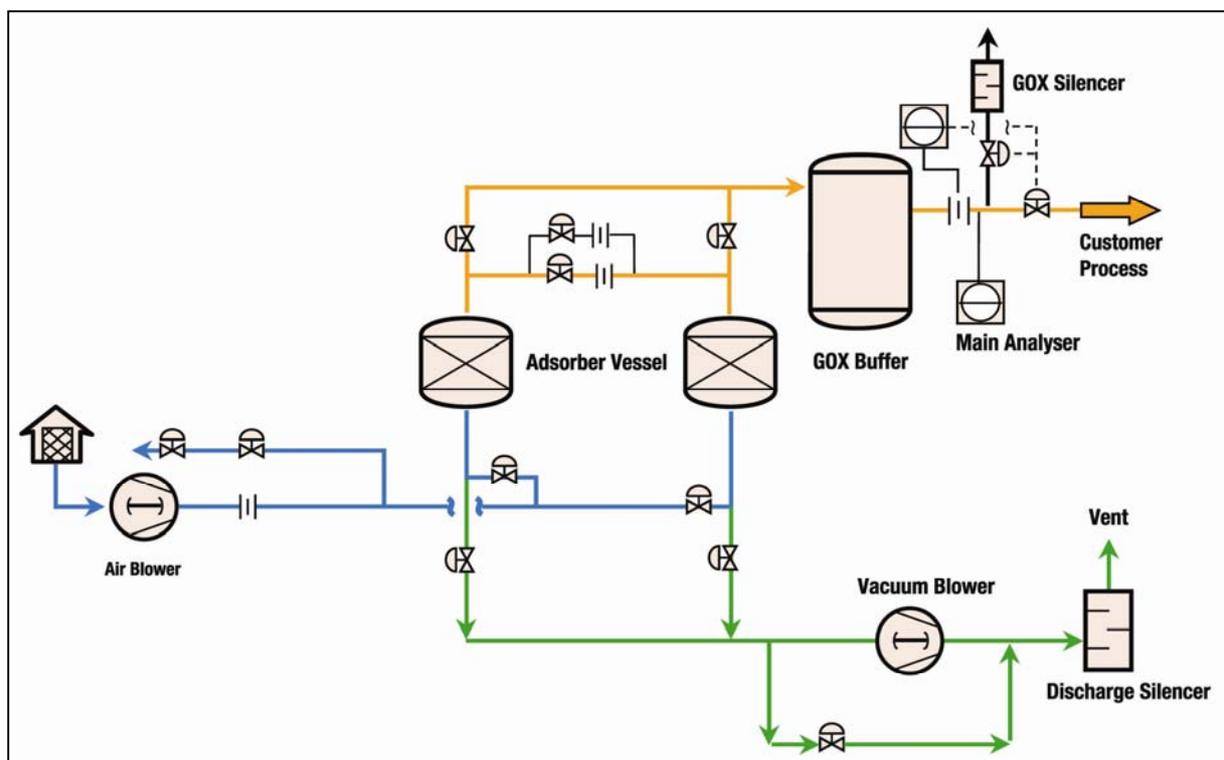


Abbildung 1: Gastrennungsadsorptionsanlage (Quelle: AirProducts)

Um die Sauerstoffproduktion nicht unterbrechen zu müssen, werden meist zwei Adsorberbehälter parallel geschaltet (siehe Abbildung 1). Diese werden so aufeinander abgestimmt, dass die Adsorptionsphase und die Desorptionsphase gleich lang sind, damit immer mindestens ein Adsorber zur Erzeugung von Reinsauerstoff zur Verfügung steht. VSA-Anlagen werden vollautomatisch betrieben und lassen sich kurzfristig anfahren. Der Reinsauerstoff steht somit innerhalb weniger Minuten zur Verfügung. Produktkapazitäten bis etwa 1.000 m³/h lassen sich mit diesem Verfahren wirtschaftlicher erzeugen als im Vergleich zum Tieftemperaturverfahren. Kostenvorteile zeigen sich bei den Investitionen und dem Energiebedarf, zudem ist der Bedienungsaufwand sehr gering.

Eine wirtschaftlichere Alternative für die Erzeugung größerer Mengen ab etwa 1.000 m³/h und einer höheren Reinheit des gewünschten Sauerstoffs stellt das Tieftemperaturverfahren dar. Es nutzt die unterschiedlichen Siedepunkte der Gase aus, um diese voneinander zu trennen. Hierbei wird zunächst Umgebungsluft angesaugt und durch Filter von Staubpartikeln gereinigt. Anschließend wird die gereinigte Luft auf mehrere bar verdichtet. Um die Luft von weiteren Verunreinigungen wie Wasserdampf und Kohlendioxid zu befreien, wird sie zunächst vorgekühlt und dann durch Molekularsiebe gepresst. Die so gewonnene Prozessluft wird dann durch weitere Kälteerzeugung und einen Wärmetauscher auf nahezu Verflüssigungstemperatur gebracht. Die Trennung der Gaskomponenten erfolgt dann in einer Rektifikationssäule mit zwei Bereichen unterschiedlichen Druckes. Aufgrund der unterschiedlichen Siedetemperaturen sammelt sich flüssiger Sauerstoff im Fuß der Trennkolonne, während sich der schneller flüchtige Stickstoff gasförmig am Kopf anreichert. Dies geschieht, je nach den vorliegenden Druckverhältnissen, in einem Temperaturbereich von -117 °C bis -198 °C. Im unteren Bereich der Kolonne, der unter höherem Druck steht, sammelt sich zunächst noch kein reiner Sauerstoff, sondern eine sauerstoffreiche Flüssigkeit. Diese wird anschließend in der so genannten Niederdruckkolonne weiter zerlegt, bis als Sumpfprodukt reiner Sauerstoff und als Kopfprodukt reiner Stickstoff entnommen werden kann. Der Stickstoff aus der Mitteldruckkolonne kann zum einen dem Wärmetauscher zugeführt werden, um im Gegenstrom die Prozessluft abzukühlen, oder wahlweise zur Regenerierung der Molekularsiebe verwendet werden. Beim Tieftemperaturverfahren lässt sich in einem weiteren Schritt auch noch das Argon abtrennen. So wird im Vergleich zum Gastrennungsadsorptionsverfahren eine höhere Reinheit des Sauerstoffs erreicht.

In Zukunft könnten als weitere Alternative zur Luftzerlegung keramische Membranen dienen, die nur für Sauerstoff durchlässig sind. Zurzeit erfordert dieser Trennprozess allerdings eine Betriebstemperatur von über 800 °C und findet deshalb nur in Kopplung mit Kraftwerkprozessen Anwendung (Sommer und Reuner, 2003).

Durch das Verfahren der Elektrolyse ist es möglich, Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zu zerlegen. Dieser Prozess wird meist genutzt, um Wasserstoff für den Einsatz in Brennstoffzellen zu gewinnen. Der dabei erzeugte Sauerstoff wird in der Regel aufgrund von Verunreinigungen in die Umgebungsluft abgegeben, kann jedoch auch ohne weitere Aufbereitung für den biologischen Abwasserreinigungsprozess genutzt werden. Die

Elektrolyse benötigt Strom, der auf Kläranlagen aus Faulgas gewonnen werden kann. Durch die Verwendung des Reinsauerstoffs kann Energie bei der Belüftung der biologischen Stufe eingespart und der Wasserstoff durch den Einsatz in Brennstoffzellen zur Energiegewinnung genutzt werden (Schröder, 2002).

Vor der Entwicklung des Tieftemperaturverfahrens wurde reiner Sauerstoff durch das so genannte Bariumoxid-Verfahren gewonnen, welches jedoch aufgrund seines hohen Energiebedarfs meist unwirtschaftlicher gegenüber anderen Verfahren ist. Dabei wird Bariumoxid unter Zufuhr von Luft auf 500 °C erhitzt, wodurch sich Bariumperoxid bildet. Erhitzt man dieses weiter auf eine Temperatur von 700 °C, gibt es den zuvor aus der Luft aufgenommenen Sauerstoff wieder ab.

Weitere sauerstoffreiche anorganische Verbindungen setzen bei Erwärmung oder durch Reaktion mit Reduktionsmitteln Sauerstoff frei. Zu diesen zählen Kaliumpermanganat, Kaliumnitrat, Kaliumchlorat und Kaliumchromat. Im Labor lässt sich darüber hinaus noch durch die Zersetzung von Wasserstoffperoxid (H_2O_2) an platinierter Nickelfolie Sauerstoff erzeugen (Greenwood und Earnshaw, 1991). Die zuletzt genannten Systeme zur Erzeugung von Reinsauerstoff finden aber aufgrund ihrer Unwirtschaftlichkeit in der Abwassertechnik üblicherweise keine Anwendung.

3.2 Eintragsysteme

Die Sauerstoffzufuhr stellt eine wesentliche Aufgabe der Begasung in der biologischen Stufe einer Kläranlage mit Belebungsverfahren dar. Dort benötigen die Mikroorganismen im Belebtschlamm Sauerstoff für ihre Stoffwechselaktivitäten, durch die der Abbau des biochemischen Sauerstoffbedarfes (BSB) und die Nitrifikation sichergestellt werden sollen. In der Literatur wird von etwa 1 kg O_2 /kg BSB_5 und 4,6 kg O_2 /kg NH_4-N ausgegangen (ATV, 1997). Die Sauerstoffzufuhr wird in kg O_2 /h angegeben. Oberhalb einer Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken von 2 mg/l steigt die Umsatzgeschwindigkeit der Nitrifikanten nur noch sehr gering an (DWA, 2006). Daher sollte die Steuerung der Begasung so ausgelegt sein, dass dieser Wert nicht überschritten wird, um Energiekosten zu vermeiden.

Ein positiver Nebeneffekt der Begasung ist die Durchmischung des aeroben Beckens, durch die der Belebtschlamm in Schwebelage gehalten werden soll. Dies ist nötig, um ihn ausreichend mit Sauerstoff und Substrat zu versorgen. Reicht die Begasung allein nicht aus, um dies zu gewährleisten, sind zusätzlich Rührer zu integrieren, die bei sinnvoller Ausrichtung auch für einen längeren Verbleib der Gasblasen im Belebungsbecken sorgen und so den Sauerstoffeintrag erhöhen.

Beim BSB-Abbau wird Kohlenstoffdioxid (CO_2) produziert, das aus dem Belebungsbecken ausgetrieben werden muss, da sonst der pH-Wert in den sauren Bereich absinkt, was eine Beeinträchtigung der Mikroorganismenaktivität zur Folge hat. Das Austreiben von Gasen aus Flüssigkeiten wird als Strippen bezeichnet und lässt sich z. B. durch ausreichende Begasung bewerkstelligen.

Der Sauerstoffeintrag erfolgt an der Grenzfläche zwischen Gas und Flüssigkeit. Daher sollte ein effizientes Begasungssystem möglichst große Grenzflächen schaffen. Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten Gase in Flüssigkeiten zu lösen. Entweder wird das Gas durch die Flüssigkeit geleitet oder die Flüssigkeit im Gasraum versprüht. Auf Grundlage dessen lassen sich Begasungssysteme in zwei Kategorien einteilen, zum einen die Druckbelüftungssysteme (poröse Keramiken und perforierte Gummimembranen) und zum anderen die Oberflächenbelüfter (Kreisel- und Walzenbelüfter). Um eine Reinsauerstoffbegasung bei Oberflächenbelüftung zu realisieren ist es erforderlich, das belüftete Becken gasdicht abzudecken und dem Gasraum Reinsauerstoff zuzuführen.

Als Sonderfall der Oberflächenbelüftung ist noch das Tropfkörperverfahren zu nennen. Hier wird das Abwasser im Gasraum verrieselt und kommt dabei mit Sauerstoff in Kontakt. Soll dies mit reinem Sauerstoff erfolgen, ist wiederum der Reaktor gasdicht abzudecken und der Gasraum mit Reinsauerstoff zu beschicken.

Als Vorteile der Oberflächenbelüftung sind vor allem die im Vergleich zur Druckbelüftung geringen Investitionskosten und die einfache Handhabung zu nennen. Sie lassen sich schnell installieren und sind für die Durchführung von Wartungsarbeiten meist gut zugänglich. Nachteile sind die Aerosol- und Lärmentwicklung, die sich jedoch bei abgedeckten Systemen relativieren.

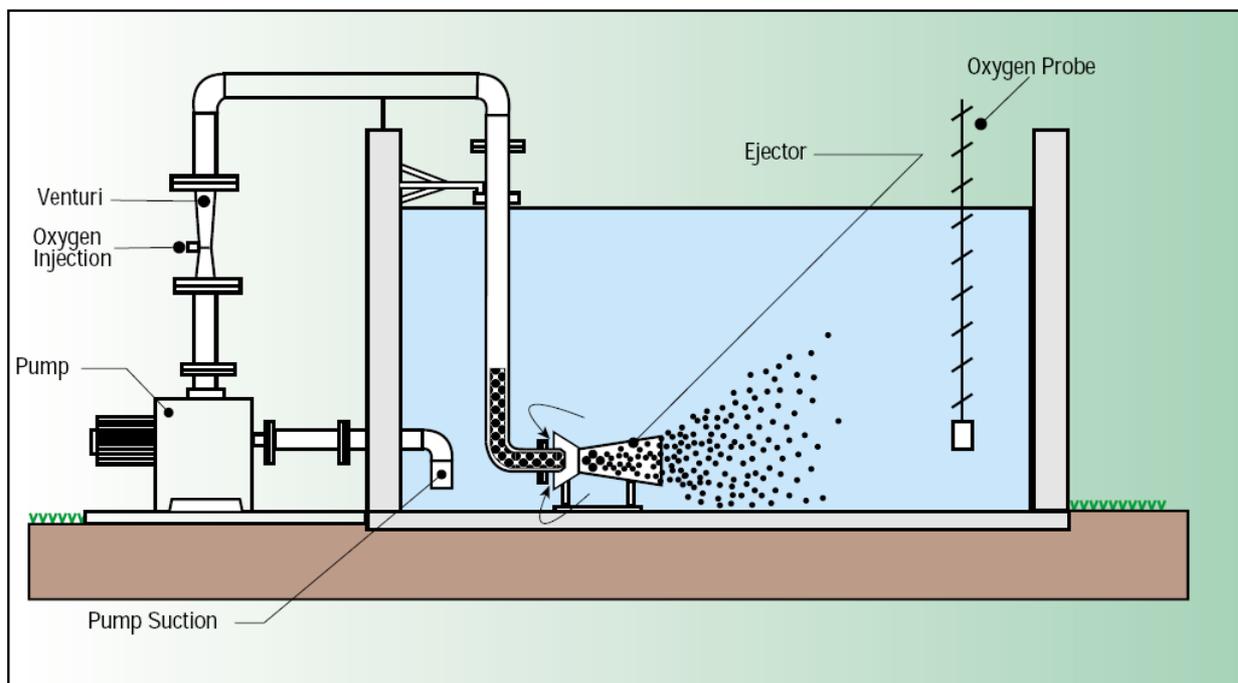


Abbildung 2: Injektorprinzip (Halia® Venturi Aeration System for LOX installations, Quelle: AirProducts)

Ein wesentlich robusteres, jedoch mit geringerem Sauerstofftrag einhergehendes Verfahren, besteht in der Sauerstoffbegasung mit Injektoren (siehe Abbildung 2 und Anhang 2). Diese saugen einen Abwasserteilstrom des Belebungsbeckens an, leiten ihn durch ein Venturi-Rohr und reichern ihn dort mit Reinsauerstoff an. In der darauf folgenden Mischstrecke löst sich der Sauerstoff teilweise unter Druck. Der Rest wird in Form kleiner Blasen in das Belebungsbecken getragen (Hulsbosch und Falkenroth, 2008). Durch entsprechende Einstellwinkel des Düsensystems kann die Aufenthaltszeit der Gasblasen im Abwasser variiert werden. Dieses Eintragungssystem ist auch bei hohen Abwassertemperaturen und Abwässern mit hohen Fett- und Tensidkonzentrationen einsetzbar (Müller, 1999). Eine Weiterentwicklung der Begasung auf Basis des Injektorprinzips sind Superkavitationsbelüfter. Hier kommt der Sauerstoff mit verdampftem Wasser in der Gasphase in Kontakt. Dieses System stellt Gasblasen mit sehr kleinen Durchmessern zur Verfügung (Schmid, 2006).

Ein weiteres Verfahren zur Druckbegasung stellen Oxidatoren dar. Dies sind spezielle Druckbehälter, in die chargenweise Abwasser gepumpt wird. Dort wird es unter einem Druck von zwei bis vier bar mit Reinsauerstoff angereichert. Auf diese Weise löst sich der Sauerstoff blasenfrei bei einer Sauerstoffausnutzung von über 90 % (Müller, 1999).

Ein wesentlicher Vorteil der Druckbegasung liegt darin, dass sich ein im Vergleich zu den Oberflächenbelüftern höherer Sauerstoffeintrag erzielen lässt. Des Weiteren zeigt die Druckbegasung keine Anfälligkeit im Winterbetrieb (Frey, 2006) und ist auch in tiefen Becken einsetzbar (Hosang und Bischof, 1998).

Neben der Oberflächen- und Druckbegasung besteht auch die Möglichkeit einer chemischen Sauerstoffversorgung. Dazu wird Wasserstoffperoxid (H_2O_2) in das Abwasser gegeben, das dort dissoziiert und so Sauerstoff freisetzt (Müller, 1986). Dieses Verfahren kommt in der Abwassertechnik aus Kostengründen jedoch selten zum Einsatz. Außerdem ist Wasserstoffperoxid ein Gefahrenstoff, der auf der Haut Verätzungen erzeugt (DWA, 2007).

Beim Einsatz von Reinsauerstoff haben sich abhängig von den örtlichen Gegebenheiten besonders Begasungsschläuche, Membranbelüfter, Tellerbelüfter und Injektoren bewährt (Brunner, 2010). Bei der Wahl des Belüftungssystems sind vor allem die Faktoren Investitions- und Betriebskosten, Betriebssicherheit, Lebensdauer, Flexibilität und Wartungsfreundlichkeit maßgebend (Brunner, 2010).

Grundsätzlich ist auch ein sog. Hybridbetrieb möglich, bei dem eine simultane Begasung mit Reinsauerstoff und Luft erfolgt.

3.3 Einflussparameter

Um die gesetzlich vorgeschriebenen Ablaufwerte einer Kläranlage mit Belebungsverfahren dauerhaft und effizient einhalten zu können ist es wichtig, die Mikroorganismen mit der erforderlichen Menge an Sauerstoff zu versorgen. Dazu muss Sauerstoff im Abwasser gelöst werden. Die Löslichkeit von Sauerstoff unter Betriebsbedingungen einer Kläranlage ist jedoch von vielen Faktoren abhängig, die sich teilweise gegenseitig beeinflussen.

Der Stofftransport des Gases in die Flüssigkeit findet an der Grenzfläche statt. Daher ist es zweckmäßig, eine möglichst große bzw. sich ständig erneuernde Grenzfläche zur Verfügung zu stellen. Wie dies erreicht wird, ist zunächst abhängig von dem gewählten Eintragungssystem (siehe Kapitel 3.2). Oberflächenbelüfter bewirken dies durch eine hohe Turbulenz, bei der Druckbegasung lässt sich eine größere Grenzfläche durch die Bereitstellung kleinerer Blasen erreichen. Ausgehend von einer kugelförmigen Gasblase berechnet sich die spezifische Grenzfläche zu

$$a = \frac{A}{V} = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^2}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3} = \frac{3}{r} \quad [\text{m}^{-1}].$$

Die spezifische Grenzfläche nimmt mit zunehmendem Radius der Gasblase ab. Im Abwasser können jedoch grenzflächenaktive Stoffe wie Tenside oder Detergentien aus Wasch- bzw. Reinigungsmitteln enthalten sein, welche die Umwandlung von kleinen in größere Blasen fördern und sich somit negativ auf den Sauerstoffeintrag auswirken.

Der Sauerstoffeintrag in Reinwasser (OC_R) ist neben der spezifischen Grenzfläche auch von der Diffusionsgeschwindigkeit und der Sättigungskonzentration abhängig. Als Sättigungskonzentration wird die Konzentration eines Gases in einer Lösung bezeichnet, die sich aus dem Partialdruck des Gases über der Lösung ergibt. Verglichen mit Luftsauerstoff (21 Vol.-%, siehe Tabelle 1) hat Reinsauerstoff (100 Vol.-%) einen um den Faktor $100/21 = 4,76$ höheren Partialdruck als Luftsauerstoff. Folglich ist auch die Sättigungskonzentration um diesen Faktor höher, was sich positiv auf den Sauerstoffeintrag auswirkt bzw. den Energieaufwand für den Eintrag von Sauerstoff in das Belebungsbecken vermindert.

Die Sättigungskonzentration nimmt allerdings gegensätzlich zum Verhalten des Diffusionskoeffizienten mit steigenden Temperaturen ab (siehe Tabelle 2). Eine Erhöhung des Partialdrucks ergibt sich auch aus der Erhöhung des hydrostatischen Druckniveaus (Siekman, 1986). So lässt sich der Sauerstoffeintrag bei der Druckbelüftung dadurch verbessern, dass der Sauerstoff in größerer Wassertiefe eingeblasen wird, sollte dies baulich möglich sein. Eine zusätzliche Verbesserung ergibt sich dabei durch die längere Aufenthaltszeit der Gasblasen im System.

Im Merkblatt DWA-M 209 zur Messung der Sauerstoffzufuhr von Belüftungseinrichtungen (DWA, 2007) wird die Standard-Sauerstoffzufuhr in belebten Schlamm angegeben.

Der β -Wert berücksichtigt die Abnahme der Sättigungskonzentration in Abwässern mit hohen Salzgehalten. Eine höhere Salzkonzentration kann jedoch vor allem bei Druckbelüftungssystemen einen positiven Effekt auf den Sauerstoffeintrag haben, da die Koaleszenzwirkung, also die Neigung der Gasblasen sich zu größeren Blasen zu vereinigen, gehemmt wird (ATV, 1985).

Tabelle 2: Sättigungskonzentrationen c_s [mg/l] von technisch reinem Sauerstoff in Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur und vom Druck (Quelle: ATV, 1985)

t [°C]	p [bar]					
	1	2	4	6	8	10
0	69,82	139,64	279,28	418,92	558,56	698,20
2	65,96	131,92	263,84	395,76	527,68	659,60
4	62,43	124,86	249,72	374,58	499,44	624,30
6	59,24	118,48	236,96	355,44	473,92	592,40
8	56,32	112,64	225,28	337,92	450,56	563,20
10	53,66	107,32	214,64	321,96	429,26	536,60
12	51,27	102,54	205,08	307,62	410,16	512,70
14	49,03	98,06	196,12	294,18	392,24	490,30
16	46,98	93,96	187,92	281,88	375,84	469,80
18	45,07	90,14	180,28	270,42	360,56	450,70
20	43,31	86,62	173,24	259,86	346,48	433,10
22	41,64	83,28	166,56	249,84	333,12	416,40
24	40,11	80,22	160,44	240,66	320,88	401,10
26	38,68	77,36	154,72	232,08	309,40	386,80
28	37,30	74,60	149,20	223,80	298,40	373,00
30	36,01	72,02	144,04	216,06	288,08	360,10

Als entscheidendes Wirtschaftlichkeitskriterium einer Belüftungseinrichtung wird der Sauerstofftrag α SAE herangezogen (Gegenmantel, 1978). Er gibt die Menge an Sauerstoff an, die von einer Belüftungseinrichtung pro Kilowattstunde in ein Belebungsbecken unter Standardbedingungen eingetragen wird (DWA, 2007). Dazu wird der Quotient aus der Standard-Sauerstoffzufuhr α SOTR und der Leistungsaufnahme P der Belüftungseinrichtung gebildet.

Arbeitet die Belüftungseinrichtung in Kombination mit einer Mischeinrichtung, ist die Leistungsaufnahme einschließlich dieser zu bestimmen. Eine Mischeinrichtung kann sich positiv auf den Sauerstoffeintrag auswirken. Zum einen wird dadurch der Belebtschlamm in Schwebelage gehalten und die Transportwege des Sauerstoffs durch das Flüssigkeitsmedium werden verkürzt. Weiterhin lässt sich bei der Verwendung von Druckbegasungselementen der Aufstiegsweg der Gasblasen verlängern, wodurch ein längerer Zeitraum für den Stofftransport von Reinsauerstoff in die Flüssigkeit zur Verfügung gestellt wird.

3.4 Vorteile der Reinsauerstoffbelüftung

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, ist durch die höhere Sättigungskonzentration von Reinsauerstoff im Vergleich zum Luftsauerstoff der Sauerstoffeintrag in ein Belebungsbecken höher. Die Bakterien werden besser mit Sauerstoff versorgt, daher sind insgesamt weniger Bakterien zum Abbau der gleichen Menge organischer Stoffe erforderlich, wodurch sich eine geringere Überschussschlammproduktion einstellt (Hansen et al., 1996; Hegemann, 1974). Folglich muss weniger Energie in die Schlammbehandlung und Schlammentsorgung investiert werden.

Abwässer mit hohen Feststoffkonzentrationen, wie sie häufig bei industriellen Prozessen anfallen, lassen sich durch Reinsauerstoffbegasung auch dann noch ausreichend mit Sauerstoff versorgen, wenn die Kapazität konventioneller Belüftungssysteme bereits überschritten ist. Laut Böhnke et al. (1979) darf die zulässige Schlammbelastung, also das Verhältnis der täglich zugeführten BSB₅-Fracht im Abwasser zur im Belebungsbecken vorhandenen Biomasse, doppelt so hoch angesetzt werden im Vergleich zu mit Luftsauerstoff betriebenen Belebungsanlagen. Überlastete Abwasserreinigungsanlagen lassen sich durch eine Zusatzbegasung mit Reinsauerstoff ohne bauliche Erweiterung ertüchtigen. Meist sehr teure Erweiterungen oder Neubaumaßnahmen können gegebenenfalls vermieden werden, was vor allem bei mangelndem Platzangebot und teurem Baugrund einen großen Kostenvorteil birgt. Ist dagegen ein Neubau einer Kläranlage geplant, lässt sich diese durch die Verwendung von Reinsauerstoff kleiner dimensionieren als konventionelle Anlagen. Der Raumbedarf für das Belebungsbecken einer sauerstoffbegasteten Anlage beträgt, abhängig von der Abwasserbeschaffenheit, zwischen 50 % und 20 % des Volumens einer luftbegasteten Anlage (Böhnke et al., 1979). Es ist also möglich, bei gleichem Volumen eine Leistungssteigerung zu realisieren oder bei gleicher Leistung das Beckenvolumen zu reduzieren.

Durch die Verwendung von Reinsauerstoff wird der Sauerstoff schneller im Abwasser gelöst und es kann flexibler auf Schwankungen und Belastungsspitzen reagiert werden.

Das Gasvolumen, das zur ausreichenden Sauerstoffversorgung der Mikroorganismen im Belebtschlamm in das Becken eingetragen werden muss, ist bei Reinsauerstoff im Vergleich zur Luft deutlich geringer, da die rund 78 % Stickstoffanteil der Luft wegfällt. Dadurch müssen zum einen Begasungselemente und Rohrleitungen entsprechend kleiner dimensioniert werden, des Weiteren ergibt sich eine geringere Aerosolbildung, wodurch sich eventuelle Geruchsprobleme verringern oder gar ganz vermeiden lassen.

Wird in ein Belebungsbecken der Sauerstoff über ein Druckbelüftungssystem eingetragen, muss bei der Verwendung von Luftsauerstoff ein Verdichter den notwendigen Druck erzeugen. Diese Investitions- und Betriebskosten entfallen bei der Verwendung von reinem Sauerstoff, da der Sauerstoff entweder in Druckbehältern bevorratet wird, oder bei der Vor-Ort-

Erzeugung ein ausreichender Systemdruck vorhanden ist, um den Sauerstoff in das Belebungsbecken einzutragen. Für eine VSA-Anlage gilt dies allerdings nur bedingt, da sie einen Vordruck von lediglich ca. 0,2 bar erzeugt, so dass ein zusätzlicher Verdichter erforderlich sein kann.

Bei der Vor-Ort-Erzeugung von Reinsauerstoff wird meist ein kleinerer Speichertank benötigt. Damit wird das damit verbundene Sicherheitsrisiko reduziert. Die Sauerstoffzufuhr ist zudem unabhängig von der Logistik (bestehend aus Transport, Abfüllen etc.). So werden Betriebsunterbrechungen vermieden, die sonst die Folge von Lieferschwierigkeiten wären. Dies gilt insbesondere für exponierte Lagen, die fern ab von Hauptverkehrswegen liegen. Falls Lieferunterbrechungen prozessbedingt nicht hinnehmbar sind, ist die Kombination aus Vor-Ort-Erzeugung und Anlieferung von Reinsauerstoff zu empfehlen.

3.5 Anwendungsgebiete und Anwendungsgrenzen

Anlagen mit einer Reinsauerstoffbegasung können überall dort zum Einsatz kommen, wo die spezifischen Vorteile gegenüber der konventionellen Belüftung (siehe Kapitel 3.4) genutzt werden können und so ein Kostenvorteil entsteht. Dies ist denkbar bei einer platzsparenden Erweiterung von bereits bestehenden, überlasteten Kläranlagen. Der geringere Platzbedarf und der verbesserte Sauerstoffeintrag bieten auch bei Neubauprojekten Kostenvorteile, vor allem wenn hochkonzentrierte Abwässer zu reinigen sind. Daher findet die Reinsauerstoffbegasung vor allem in industriellen Klärwerken zur Spitzenlastabdeckung Anwendung.

Sinnvoll ist die Begasung mit Reinsauerstoff ebenfalls, wenn aufgrund von Geruchsproblemen die Abgasmenge auf ein Minimum reduziert werden soll. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass durch die im Vergleich zur Luftbegasung geringere Gasmenge auch die bei Abbauprozessen entstehende Kohlensäure in nur geringerem Umfang aus den Belebungsbecken ausgetragen wird. Dies kann bei geringer Pufferkapazität des Abwassers zu einem Absinken des pH-Wertes führen, was die Aktivität der Mikroorganismen beeinträchtigen kann. Ggf. müssen zusätzliche Rührwerke eingesetzt werden, deren Energieverbrauch bei der Gesamtenergiebilanz zu berücksichtigen sind.

Die Sauerstoffzufuhr lässt sich bei Reinsauerstoffbegasung flexibler an Bedarfsschwankungen anpassen (siehe Kapitel 3.3). Daher ist die Begasung mit Reinsauerstoff in Klärwerken von z. B. Fremdenverkehrsarten sinnvoll, wo saisonale Schwankungen im Abwasseranfall existieren, oder in Industrieklärwerken, in denen die produktionsbedingten Abwasserbelastungen nicht durch ein Ausgleichsbecken ausgeglichen werden können. Dies gilt ebenfalls für Batch-Verfahren, bei denen das Abwasser chargenweise anfällt und so zeitweise ein sehr hoher Sauerstoffbedarf vorhanden ist.

Weitere Vorteile bestehen bei stark zum Schäumen neigenden Abwässern. Eine Schaumbildung kann wegen der geringeren eingetragenen Gasmenge durch den Einsatz einer Reinsauerstoffbegasung im Vergleich zu einer herkömmlichen Belüftung verringert werden. Beim Eintrag von Sauerstoff in Prozesswässer mit hohen Temperaturen können durch die Verwendung von Reinsauerstoffbegasung hohe Temperaturverluste vermieden werden.

Reinsauerstoff wird auch genutzt, um in Druckrohrleitungen Schwefelwasserstoff zu oxidieren und so Geruchsemissionen und Korrosion von Betonbauteilen zu vermeiden (Urban et al., 2004; Friedrich et al., 2004). Ein weiteres Anwendungsgebiet ist das Nassoxidationsverfahren, das auf einigen Kläranlagen zur Schlammbehandlung genutzt wird (Müller et al., 2003). Aus Reinsauerstoff lässt sich zudem Ozon (O_3) erzeugen, welches für andere Abwasserreinigungsprozesse genutzt werden kann, z. B. zur Desinfektion oder zur Schlammdeintegration. Weitere Anwendungsfelder für Reinsauerstoff bestehen in der Behandlung von Abwässern mit schwer abbaubarem CSB sowie giftigen Chemikalien.

Das Hauptargument gegen den Einsatz von Reinsauerstoff sind die im Vergleich zum frei verfügbaren Luftsauerstoff höheren Betriebskosten durch die Produktion von technischem Sauerstoff. Wird der Reinsauerstoff zur Kläranlage geliefert, muss zum einen der Aufwand für Nachbestellungen und Lieferverträge mit eventuellen Mindestabnahmemengen bedacht werden. Zum anderen wird ein Vorratsspeicher benötigt, mit dem entsprechenden Platzbedarf und den nötigen Sicherheitsvorkehrungen. Zu den Sicherheitsvorkehrungen sind neben der Lagerung auch die Verwendung öl- und fettfreier Armaturen und Ventile zu nennen, da Sauerstoff die Eigenschaft besitzt, die Zündtemperatur fast aller Stoffe herabzusetzen (BG Chemie, 2008). Bei der Erzeugung von Reinsauerstoff vor Ort sind zwar Logistik und Vorratsspeicherung zu vernachlässigen, dafür müssen die für das entsprechende Verfahren anfallenden Investitionskosten und anschließenden Betriebs- und Wartungskosten eingeplant werden.

4 Beschreibung der Pilotanlage

4.1 Kläranlage Haren

Die für das Projekt ausgewählte Kläranlage wird von der Emsland Frischgeflügel GmbH in Haren (Ems) im Landkreis Emsland betrieben. Die Emsland Frischgeflügel GmbH hat an diesem Standort im Jahr 2003 ihren Betrieb aufgenommen. Der Betrieb schlachtet Geflügel und verarbeitet dieses zu Frisch- und Convenienceprodukten. Im Jahr 2008 erhöhte sich die Produktionskapazität um über 100 %, wodurch eine Erweiterung der Kläranlage erforderlich wurde. Der zweite Bauabschnitt wurde in anlagen- und maschinentechnischer sowie in schalt- und steuerungstechnischer Ausführung als separate zweite Reinigungsstraße parallel zum ersten Bauabschnitt umgesetzt, was ideale Voraussetzungen bietet, um den Einsatz von Reinsauerstoffbegasung mit der konventionellen Fahrweise zu vergleichen.

Starke Schwankungen des Zulaufs ergeben sich aus dem Produktionszyklus, da am Wochenende nicht gearbeitet wird und entsprechend weniger Abwasser anfällt. Im Jahr 2010 wurden der Kläranlage an Arbeitstagen durchschnittlich 3.118 m^3 Abwasser zugeführt (5-Tage-Mittel). Das im Betrieb anfallende Abwasser wird zunächst in ein etwa 300 m^3 fassendes Misch- und Ausgleichsbecken gefördert, um den Zulauf zu den weiteren Behandlungsstufen zu vergleichmäßigen. Der Ablauf aus dem Ausgleichbecken wird dann in zwei Teilströme getrennt und im weiteren Verlauf in zwei parallelen Straßen behandelt (siehe Abbildung 3). Im Versuchszeitraum von März bis Juni 2011 erfolgte eine Zulaufverteilung von 54 % auf Straße I und 46 % auf Straße II. Diese kann mittels Schiebern variiert werden.

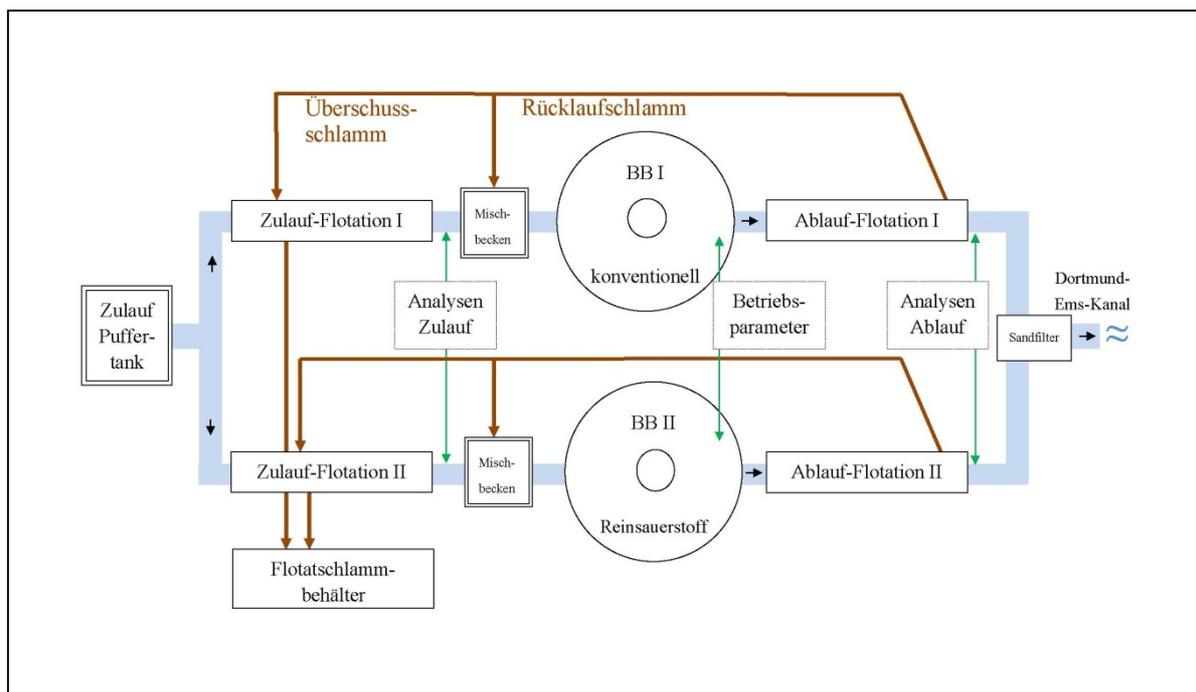


Abbildung 3: Fließschema der Pilotanlage (nicht maßstäblich)

Das Abwasser aus fleischverarbeitenden Betrieben ist sehr fetthaltig und fängt schnell an zu faulen, was zu Geruchsproblemen führen kann (ATV, 1992). Da sich das Fett schlecht sedimentieren lässt, wurde auf der o. g. Kläranlage auf ein offenes Sedimentationsbecken zur Vorklärung verzichtet. Stattdessen wird das Abwasser in zwei Abscheideanlagen (Flotationen) mit einer Oberfläche von jeweils 27 m² gefördert, wo durch feinblasige Belüftung und unter Zugabe von Polymeren die Entfernung von Grob- und Schwimmstoffen erfolgt. Der Flotatschlamm wird in einem Flotatschlammbehälter gesammelt (siehe Abbildung 3). Das vorgereinigte Abwasser wird anschließend zunächst in ein weiteres vorgeschaltetes Mischbecken und von dort aus in je ein rundes Belebungsbecken gefördert. Die Belebungsbecken sind in einen äußeren und einen inneren Ring unterteilt. Der Durchmesser des inneren Ringes beträgt 13 m, der des äußeren 25,5 m. Die Beschickung erfolgt in den inneren unbelüfteten Ring, der zur Denitrifikation genutzt wird. Der äußere Ring wird mit intermittierender feinblasiger Druckbelüftung gefahren. Die Belüftung erfolgt mit jeweils drei Belüfterelementen, auf denen Membrankerzenbelüfter installiert sind. Zur konstanten Durchmischung ist zusätzlich je ein Rührwerk installiert. Die Becken sind 6 m tief, so dass sich mit einem Freibord von mindestens 0,5 m ein maximaler Füllstand von 5,5 m ergibt. Über den Zeitraum der Voruntersuchungen im Jahr 2010 waren die Becken im Mittel zu 75 % gefüllt, womit die mittlere Verweilzeit bei etwa 30 Stunden lag. Um die Stickstoffelimination zu gewährleisten, wurde der Trockensubstanzgehalt in der kalten Jahreszeit erhöht, da bei niedrigen Abwassertemperaturen die Aktivität der Mikroorganismen abnimmt. Über den Rest des Jahres wurde das Belebungsbecken mit einem durchschnittlichen Trockensubstanzgehalt von etwa 4 mg/l betrieben. Die Maximaltemperatur des Abwassers beträgt 26,4 °C, die Minimaltemperatur 14,0 °C. Das mit Sauerstoff zu versorgende Volumen an Abwasser im äußeren belüfteten Ring des Belebungsbeckens ergibt sich mit der o. g. Geometrie und dem durchschnittlichen Beckenfüllstand von 75 % zu etwa 1.500 m³.

Die Konzentration des chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) im Zulauf zu den Belebungsbecken wird mit Stichprobenmessungen (einmal täglich) ermittelt. Im Mittel lag die Konzentration des chemischen Sauerstoffbedarfs im Jahr 2010 bei ca. 800 mg/l.

Als Nachklärung ist eine weitere Flotation mit einer Oberfläche laut Auslegungsplanung von je 40 m² vorhanden. Zur Optimierung der Flotationseigenschaften erfolgt gegebenenfalls eine Polymerzugabe in den Ablauf der Belebung über eine Dosierstation. Der Ablauf aus der Nachklärung wird dann über einen Sandfilter in den Dortmund-Ems-Kanal eingeleitet.

Der Schlammabzug aus der Nachklärung wird als Rücklaufschlamm in das Mischbecken vor der Belebung und in Teilen als Überschussschlamm in die Vorklär-Flotation gegeben. Das gemischte Flotat der beiden Vorklärflotationsanlagen wird dem Flotatschlammbehälter zugeführt (siehe Abbildung 3). Der hier gesammelte Schlamm wird zur weiteren energetischen Verwertung abgegeben. Für Betriebsstörungen steht ein Havariebecken zur Verfügung.

In Tabelle 3 sind die Anforderungen der Abwasserverordnung und die Einleiterwerte für die Kläranlage der Emsland Frischgeflügel GmbH dargestellt.

Tabelle 3: Anforderungen an das Abwasser für die Einleitungsstelle

	AbwVO*	KA Haren**
CSB [mg/l]	110	70
NH₄-N [mg/l]	10	10
N_{ges} [mg/l]	18	16

*Abwasserverordnung 2004, Anhang 10: Fleischwirtschaft: Anforderungen an das Abwasser an der Einleitungsstelle, qualifizierte Stichprobe oder 2-Stunden-Mischprobe in mg/l

**Reinigungsziele der KA der Emsland Frischgeflügel GmbH in mg/l

4.2 Pilotanlage

Für den Eintrag von dem vor Ort produzierten Reinsauerstoff wurde Belebungsbecken II vorgesehen. Zur Erzeugung von reinem Sauerstoff wurde in unmittelbarer Nähe zum Belebungsbecken II eine Vakuumwechseladsorptionsanlage (VSA) aufgestellt. Es handelt sich dabei um das Sauerstofferzeugungssystem HALIA[®] Oxygen Generator Series T1 (HALIA[®] Sauerstoffanreicherungssystem der Serie T1) der Firma AirProducts. Die Anlage besteht aus zwei Gebläsen, zwei Adsorberbehältern, einem Ausgleichsbehälter und einem Container, in dem die Schaltanlage und die Ventile untergebracht sind (siehe Abbildung 4). Die Adsorberbehälter haben ein Volumen von je 3 m³, der Ausgleichs- und Speicherbehälter ein Volumen von 10 m³.

Im Anhang 1 ist der Grundriss des Belebungsbeckens II und der VSA-Anlage dargestellt. Die Brücke über den belüfteten äußeren Ring dient unter anderem für Wartungsarbeiten und zur Probennahme. Ebenfalls im Belebungsbecken zu erkennen sind die vier Eintragungssysteme für den Reinsauerstoff, wobei in jedem Kreisviertel eines an der Innenseite der Außenwand an einer Führungsschiene befestigt ist. Neben dem Belebungsbecken ist das Fundament der VSA-Anlage zu sehen, in dessen Mitte der Container mit der Schalttechnik, den Ventilen und den Rohrleitungen dargestellt ist.

Die Reinsauerstoff-Anlage kann laut Herstellerangabe einen Nennvolumenstrom von bis zu 5.500 kg O₂/d mit einer Reinheit von 90 bis 93 % erzeugen. Geeignete Anwendungsbeispiele für VSA-Anlagen sind daher Branchen, in denen hochreiner Sauerstoff (> 93%) nicht erforderlich ist. Dazu zählen z. B. Abwasserbelüftung, Sauerstoff zur Ozon-Produktion, Sauerstoff für Verbrennungsprozessen in der Glas-, Stahl-, Aluminium-, Platin- und Zementindustrie und andere. Der Leistungsbedarf beträgt 74 kW bei 20°C Umgebungstemperatur.



Abbildung 4: VSA-Anlage auf dem Gelände der Emsland Frischgeflügel GmbH in Haren (Ems)

Alle vier Eintragungssysteme sind Fabrikate der Firma Landia. Drei der Systeme sind Rührwerkbelüfter mit 3-Flügel-Propeller der Reihe PODB-I, von denen zwei einen Propellerdurchmesser von 325 mm und einer von 295 mm haben. Das vierte Eintragungssystem ist ein Ejektor vom Typ Airjet AJ-150-1 mit einer 60 mm Düse. Bei den Rührwerkbelüftern PODB-I wird der Reinsauerstoff unmittelbar hinter dem Propeller über eine Venturidüse in das Belebungsbecken dispergiert und mit steigender Drehzahl des Propellers in kleineren Blasen eingetragen. Zusätzlich wird dadurch eine Umwälzung des Abwassers erreicht. Der Airjet AJ-150-1 besitzt eine 60 mm Ejektordüse, in der ein angesaugter Abwasserstrom mit dem durch Unterdruck selbstansaugendem Reinsauerstoff vermischt und dann unter hohem Druck in das Belebungsbecken eingetragen wird. Beide Systeme wurden an einer Führungsschiene montiert. An dieser kann über eine Winde die Eintauchtiefe des Eintragungssystems, sowie dessen Ausrichtung variiert werden. Der Rührwerkbelüfter mit einem Propellerdurchmesser von 295 mm wurde 2 m oberhalb der Beckensohle installiert. Die beiden Belüfter mit einem Propellerdurchmesser von 325 mm befinden sich 1,5 m über der Beckensohle und der Airjet sitzt einen halben Meter oberhalb der Beckensohle.

Die Installation der Steuerungstechnik übernahm die HST Hydro-Systemtechnik GmbH. Die Prozessleittechnik HydroDat wurden konfiguriert und mit dem auf der ausgewählten Kläranlage bestehenden Prozessleitsystem abgeglichen. Die Installation der Ausrüstung erfolgte durch AirProducts.

Die Inbetriebnahme und der Start des Betriebes erfolgten mit erheblichen Unterbrechungen und technischen Problemen. Neben Lieferproblemen der Reinsauerstofferzeugungseinheit führten unerwartete technische Anpassungen (z.B. pH-Wert-Absenkung durch mangelnde CO₂-Ausstrippung, nicht bekannter schwankender Wasserspiegel, Unklarheiten bei der Datenübertragung aus dem bestehenden Prozessleitsystem zur Reinsauerstofferzeugungseinheit, technische Defekte an den Rührwerksbelüftern, erforderlicher Wechsel der Rührwerksbelüfter) zu erheblichen Zeitverzögerungen, so dass ein stabiler Versuchsbetrieb erst Anfang 2011 aufgenommen werden konnte. Der geplante Versuchsbetrieb von 12 Monaten musste daher auf wenige Monate reduziert werden, um die Budgetkosten einzuhalten. Daher sind die durchgeführten Messungen auf diesen kurzen Zeitraum beschränkt.

5 Messprogramm und Messergebnisse

5.1 Ziel

Die wissenschaftlichen Begleituntersuchungen sollten primär die Praxistauglichkeit der Pilotanlage und die Effizienz der Reinsauerstoffnutzung hinsichtlich Energiebedarf im Vergleich zur konventionellen Belüftung demonstrieren. Neben der Aufzeichnung von abwassertechnischen Routineparametern lag der Schwerpunkt des Messprogramms auf der Dokumentation der Energieverbräuche, die zur Sauerstoffversorgung der beiden Belebungsbecken aufgewendet wurden. Die in Kapitel 3.4 beschriebenen zusätzlichen Vorteile der Reinsauerstoffbelegung, wie die Verbesserung der Schlammigenschaften und Umsatzsteigerungen, stellen im Rahmen des Projektes Sekundäreffekte dar, deren Umfang in den Untersuchungen analysiert wird.

5.2 Auswahl der Parameter

Die Messkampagne, auf die im Folgenden Bezug genommen wird, wurde im Zeitraum zwischen dem 17.03.2011 und dem 09.06.2011 durchgeführt. In diesem Zeitraum wurde der Gesamtzulauf zu der Kläranlage als Tageswert aufgezeichnet. Es stehen die Daten von routinemäßig einmal täglich werktags von einem für die Kläranlage verantwortlichen Mitarbeiter der Emsland Frischgeflügel GmbH genommenen Stichproben zur Verfügung. Im Ablauf der Vorklärung wurde für beide Straßen die CSB- und Gesamtstickstoffkonzentration ermittelt. In den Belebungsbecken wurde der prozentuale Beckenfüllstand, der Schlammgehalt, der pH-Wert, die Temperatur und der Schlammvolumenindex als Tageswert aufgezeichnet sowie mittels Sauerstoffsonden der Gehalt an gelöstem Sauerstoff bestimmt. Im Ablauf der Nachklärflotation wurden die Konzentrationen an CSB, Ammoniumstickstoff und Gesamtstickstoff sowie der pH-Wert gemessen (zu den Messpunkten siehe Abbildung 3). Zusätzlich wurden vom Institut für Umwelttechnik und Management an der Universität Witten/Herdecke gGmbH mittels eines automatischen Probennehmers Tagesmischproben aus dem Ablauf der Vorklärung der Straße II gezogen. Der Probezyklus wurde auf 100 ml je 120 Minuten eingestellt. Die Proben wurden direkt in 1,5 l PE-Flaschen gefördert, die in einem Kühlschrank aufgestellt waren. Eine Kühlschranktemperatur von 2 °C sollte biologische Abbauprozesse minimieren. Die Flaschen wurden täglich gewechselt und wöchentlich immer am Freitag bezüglich der Zielparameter CSB und Gesamtstickstoff ausgewertet. Zur Bestimmung des Stromverbrauchs waren an der VSA-Anlage Stromzähler installiert. Von den vier Gebläsen der konventionellen Belüftung stehen die Laufzeiten von drei Gebläsen zur Verfügung. Von der VSA-Anlage wurde darüber hinaus die Menge an eingeblasenem Sauerstoffvolumen in Normkubikmetern erfasst.

5.3 Ergebnisse

In den folgenden Grafiken sind die Messergebnisse aus Belebungsbecken I (konventionelle Belüftung) in braun und aus Belebungsbecken II (Reinsauerstoffbegasung) in grün dargestellt.

Der Gesamtzulauf zur Kläranlage wurde als Tageswert aufgezeichnet und liegt im 7-Tage-Mittel bei 2.865 m³. Die anschließende straßenbezogene Aufteilung des Zuflusses ergab einen mittleren Durchfluss von 54 % (1.547 m³) auf Straße I und 46 % (1.318 m³) auf Straße II. Hinsichtlich CSB und N zeigte die Auswertung der Tagesmischproben aus der automatischen Probenahme eine relativ gleichmäßige Korrelation von 72 % zu den täglichen Stichproben. Die Ursache hierfür liegt in den nächtlichen Reinigungszyklen, die durch die am Tag genommenen Stichproben nicht erfasst werden. Das Verhältnis der Tagesmischprobe zur Stichprobe wurde von der Emsland Frischgeflügel GmbH durch eine separate Messkampagne bestätigt. Das Produkt aus den so erhaltenen Konzentrationen mit den entsprechenden Durchflüssen liefert die Fracht an CSB bzw. Gesamtstickstoff. Diese sind für den Versuchszeitraum in Abbildung 5 dargestellt. Im Mittel beträgt auf Straße I die CSB-Fracht im Zulauf zum Belebungsbecken 1.361 kg/d (15.122 EW) und die Gesamtstickstofffracht 139 kg/d. Auf Straße II wurden eine CSB-Fracht von durchschnittlich 1.007 kg/d (11.189 EW) und eine gemittelte Fracht an Gesamtstickstoff von 108 kg/d bestimmt.

Abbildung 6 zeigt den Verlauf der gemittelten Tageswerte des gemessenen Beckenfüllstandes, der in den beiden Belebungsbecken ähnlich verläuft. Über den Versuchszeitraum ergibt sich eine maximale Differenz von 14,8 %-Punkten in Belebungsbecken II, was bei einer maximalen Wassertiefe von 5,5 m eine Schwankung von 81,4 cm ausmacht. Der maximale Wasserstand beträgt dabei 4,51 m, während der Tiefststand bei 3,70 m liegt. Der Mittelwert des prozentualen Beckenfüllstandes über den Versuchszeitraum beträgt in Belebungsbecken I 72,8 % und in Belebungsbecken II 73,9 %, was für das Belebungsbecken I eine durchschnittliche Wassertiefe von 4,01 m und für das Belebungsbecken II von 4,07 m bedeutet.

Der Schlammgehalt in Belebungsbecken I beträgt durchschnittlich 3,9 g/l, der in Belebungsbecken II im Mittel 3,7 g/l. Die Tiefstwerte liegen in beiden Belebungsbecken bei 3,0 g/l. Der höchste Schlammgehalt, der in Belebungsbecken I gemessen wurde, beträgt 5,2 g/l, der Höchstwert in Belebungsbecken II beträgt 4,7 g/l.

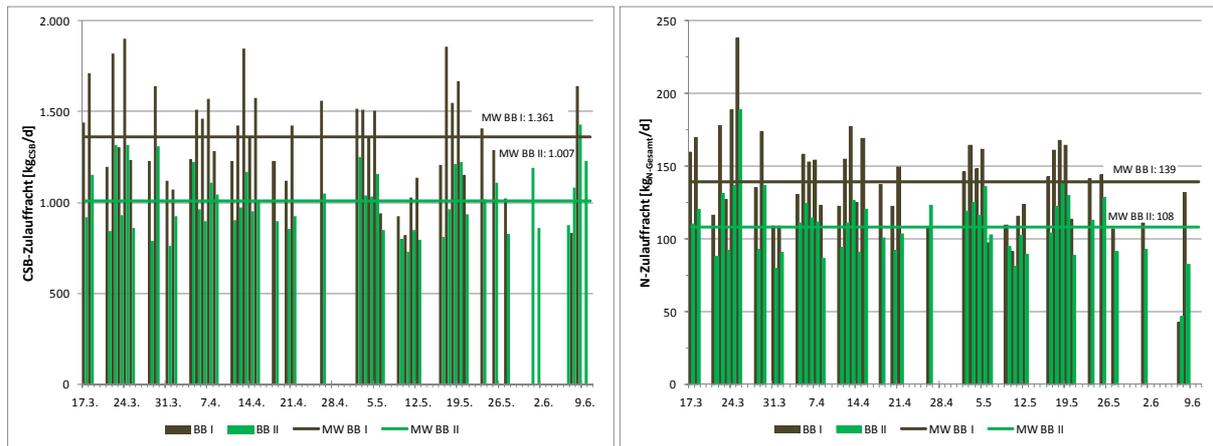


Abbildung 5: CSB- und Gesamtstickstoff-Zulauf fracht

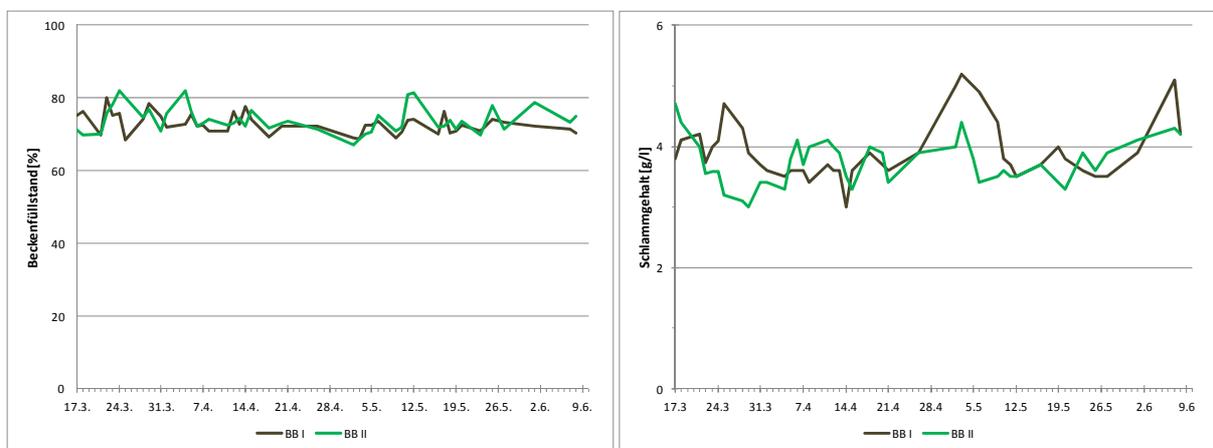


Abbildung 6: Beckenfüllstand und Schlammgehalt

Bei der Betrachtung der Tagesstichproben des pH-Wertes (siehe Abbildung 7) fällt auf, dass die Werte im Belebungsbecken II meist unterhalb derer im Belebungsbecken I liegen. Im Belebungsbecken I ergibt sich ein durchschnittlicher pH-Wert von 6,93, wobei das Minimum bei 6,77 liegt. In dem gleichen Zeitraum liegt der pH-Wert in Belebungsbecken II im Mittel bei 6,58 mit einem Minimum von 6,36.

Die Ergebnisse des Temperaturverlaufs der vorhandenen Tagesstichproben sind linear miteinander verbunden. Die Temperaturverläufe ähneln sich stark. Die maximale Abweichung beträgt 1,7 °C. Die Durchschnittstemperatur im Versuchszeitraum in Belebungsbecken I liegt bei 22,3 °C und in Belebungsbecken II bei 21,9 °C. Der Tiefstwert in Belebungsbecken I beträgt 20,6 °C und in Belebungsbecken II 19,6 °C. Der Höchstwert liegt in Belebungsbecken I bei 24,5 °C und in Belebungsbecken II bei 24,7 °C. Damit ergibt sich die maximale Temperaturschwankung über den Versuchszeitraum in Belebungsbecken II zu 5,1 °C.

Abbildung 8 zeigt den Verlauf des Schlammvolumenindex über den Versuchszeitraum, wobei die vorhandenen Messdaten linear miteinander verbunden sind. Der Schlammvolumenindex als Maß für die Sedimentationsfähigkeit von Belebtschlamm gibt an, welches Volumen ein Gramm Schlamm bezogen auf seine Trockenmasse nach 30 Minuten Absetzdau-

er pro Liter Belebtschlamm einnimmt. Zu Beginn der Messung liegen die Werte in Belebungsbecken II deutlich unterhalb derer in Belebungsbecken I, während sich die Verläufe der Schlammvolumenindices über den Verlauf der Messkampagne angleichen. Im Durchschnitt liegt der Schlammvolumenindex in Belebungsbecken II mit 124,8 ml/g jedoch deutlich unterhalb des gemittelten Wertes aus Belebungsbecken I mit 151,1 ml/g. Der Maximalwert liegt in Belebungsbecken I bei 237,8 ml/g und in Belebungsbecken II bei 195,0 ml/g.

In den beiden Belebungsbecken waren jeweils Sauerstoffsonden zur Bestimmung des Anteils an gelöstem Sauerstoff im Abwasser installiert. Während in Belebungsbecken I Minuten-Werte aufgezeichnet wurden, waren es in Belebungsbecken II 5-Minuten-Werte. Die entsprechenden Tagesmittelwerte zeigen, dass in Belebungsbecken II Sauerstoffkonzentrationen von bis zu 4,2 mg/l bei einer durchschnittlichen Sauerstoffkonzentration von 1,9 mg/l gemessen wurden. Zum Vergleich lag der Maximalwert in Belebungsbecken I bei konventioneller Druckbelüftung bei 2,9 mg/l mit einer durchschnittlichen Sauerstoffkonzentration von 1,2 mg/l.

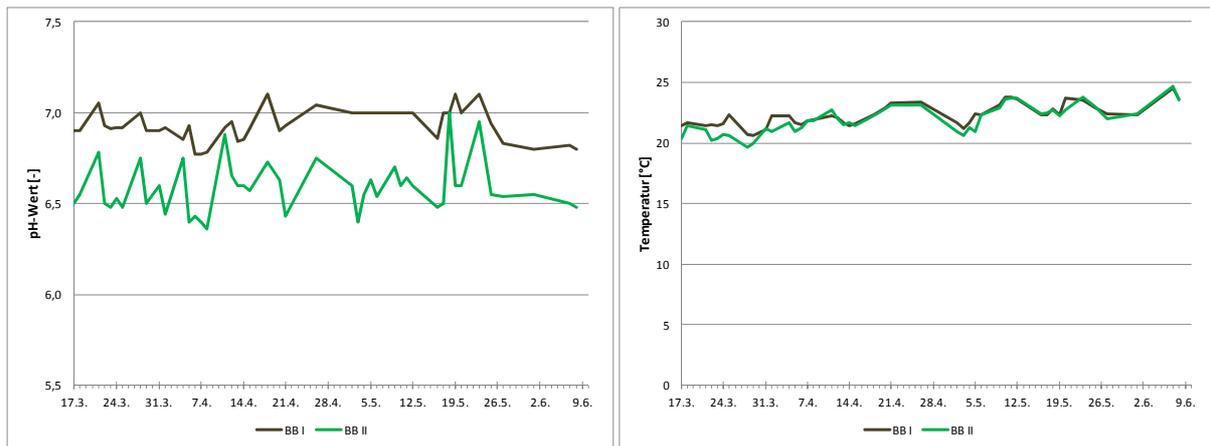


Abbildung 7: pH-Wert und Temperatur

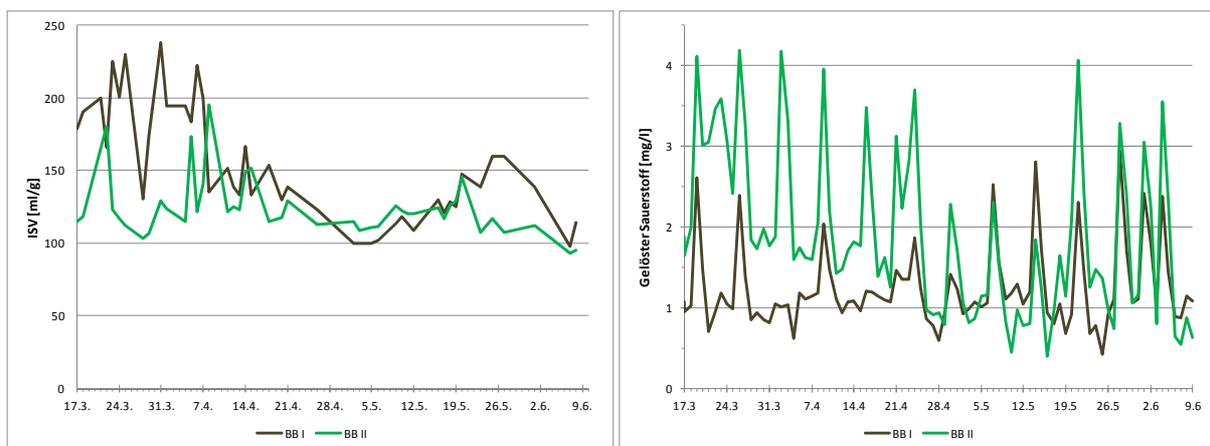


Abbildung 8: Schlammvolumenindex und gelöster Sauerstoff im Belebungsbecken I und II

In den Darstellungen des Stromverbrauchs (siehe Abbildung 9) ist zu beachten, dass in Belebungsbecken I nur die Laufzeiten von drei der vier vorhandenen Belüfter aufgezeichnet wurden (siehe Kapitel 5.2). Um das vierte Gebläse zu berücksichtigen, wurde der Mittelwert aus den Daten von Gebläse 2 und 3 berechnet, da diese zusammen mit dem vierten Gebläse in etwa zu gleichen Teilen dem frequenzgesteuerten Gebläse 1 zugeschaltet wurden. Dieser Mittelwert wurde dann mit den Daten der drei aufgezeichneten Belüfter aufsummiert. An der VSA-Anlage und den Eintragungssystemen für den Reinsauerstoff waren Stromzähler installiert, die den aktuellen Stromverbrauch in 5-Minuten-Werten aufzeichneten. In Abbildung 9 sind die daraus ermittelten Tageswerte dargestellt. Im Monat April wurden aufgrund eines Datenfehlers keine Messdaten erfasst. Da während der Belüftungsphase alle 30 Minuten für 8 Minuten eines der konventionellen Gebläse zur Ausstrippung von Kohlenstoffdioxid genutzt wurde, ergibt sich für das Belebungsbecken II der in violett dargestellte Systemstromverbrauch. Der Systemstromverbrauch setzt sich aus den Stromverbräuchen der VSA-Anlage, der vier Eintragungssysteme und der konventionellen Belüftung zusammen. Sonstige Verbraucher, wie zum Beispiel Rührwerke, sind nicht erfasst, da diese in beiden Belebungsbecken identisch und somit für einen Vergleich nicht relevant waren. Im Mittel liegt der Stromverbrauch der konventionellen Belüftung mit 1.031,2 kWh/d unterhalb des Systemstromverbrauchs der Reinsauerstoffbegasung von 1.324,5 kWh/d.

Die Reinsauerstoffgewinnung inklusive deren Eintrag in das Belebungsbecken II benötigt im Mittel einen Stromverbrauch von 1.184,5 kWh/d. Die Addition des für die CO₂-Stripung erforderlichen Belüftungszusatzfaktors von 140 kWh/d ergibt den mittleren Systemstromverbrauch von 1.324,5 kWh pro Tag. Der Belüftungszusatzfaktor von 140 kWh/d errechnet sich aus dem Leistungsbezug von 37,5 kW des Belüfters, der während den durchschnittlich sieben Belüftungsphasen am Tag, die jeweils etwa zwei Stunden betragen, halbstündlich für acht Minuten mit voller Leistung lief.

Zur Kontrolle der Einhaltung der vorgeschriebenen Ablaufkonzentrationen, und damit zur Demonstration der Praxistauglichkeit der Pilotanlage, wurden im Ablauf der Nachklärflotation Messungen durchgeführt (siehe Kapitel 5.2).

Abbildung 10 zeigt die Verläufe der CSB-Ablaufkonzentrationen der Tageswerte der beiden Belebungsbecken sowie die in rot dargestellte nicht zu überschreitende Höchstkonzentration von 70 mg/l (siehe Tabelle 3). Während des gesamten Versuchszeitraums wurde dieser Wert deutlich unterschritten. Die durchschnittliche Ablaufkonzentration des CSB liegt in Straße I bei 38,6 mg/l und in Straße II bei 35,4 mg/l. Der Höchstwert der dabei im Ablauf der Straße I gemessen wurde liegt bei 53,8 mg/l und der im Ablauf der Straße II bei 45,5 mg/l.

Ein ähnliches Bild ergab die Messung der Ammoniumstickstoffkonzentration im Ablauf der Nachklärflotation. Der Grenzwert von 10 mg/l wird ebenfalls auf beiden Straßen eingehalten. Die Konzentration der Tageswerte liegt von Straße I im Mittel bei 1,4 mg/l und von Straße II bei 1,3 mg/l. Die Maximalwerte betragen in Belebungsbecken I 5,8 mg/l und in Belebungsbecken II 5,9 mg/l.

Auch die Gesamtstickstoffkonzentrationen unterschreiten mit durchschnittlich 4,8 mg/l auf Straße I und 4,6 mg/l auf Straße II den vorgegebenen Grenzwert von 16 mg/l deutlich (siehe Abbildung 10). Die Maximalkonzentration an Gesamtstickstoff, die im Versuchszeitraum im Tagesdurchschnitt gemessen wurde, liegt im Ablauf der Straße I bei 9,2 mg/l und im Ablauf der Straße II bei 8,9 mg/l.

Die gemessenen Konzentrationen vor der Einleitung in den Vorfluter Dortmund-Ems-Kanal liegen bei allen drei Zielparametern im Ablauf der Straße II, auf der die Reinsauerstoffbegasung zum Einsatz kam, im Durchschnitt leicht unterhalb der Ablaufwerte der Straße I.

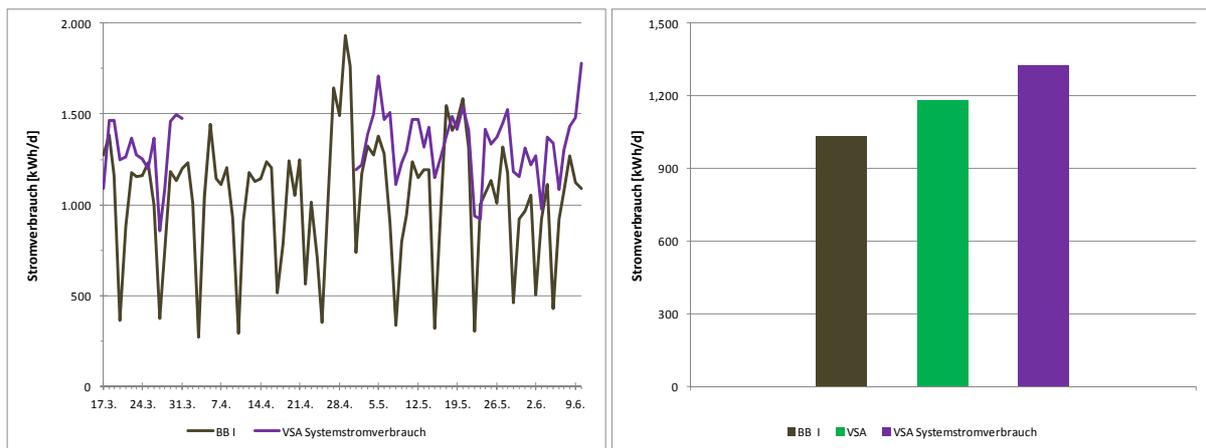


Abbildung 9: Stromverbrauch und mittlerer Tagesstromverbrauch während der Messkampagne

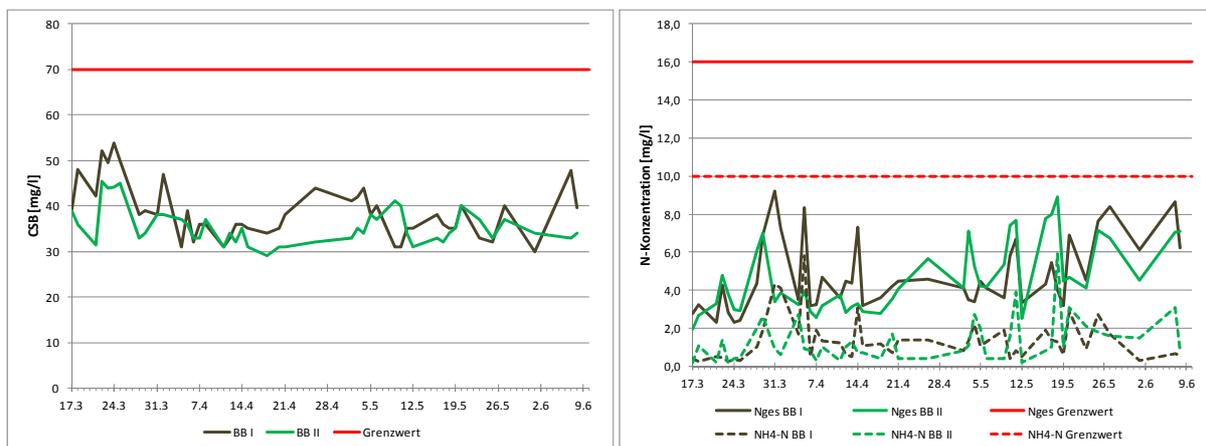


Abbildung 10: CSB- und Stickstoff-Konzentration im Ablauf

6 Bewertung der Ergebnisse

6.1 Energieverbrauch

6.1.1 Industrielle Kläranlagen

In Industriebetrieben fällt Abwasser durch die Verwendung von Wasser als Reinigungsmittel, Lösemittel, Hilfsmittel und durch den Gebrauch als Energieträger, z. B. in Form von Kühlwasser, an. Der Wasserverbrauch unterscheidet sich je nach Industriezweig erheblich. Während in manchen Produktionsverfahren Verluste durch Verdampfung oder Verbleib des Wassers im Produkt entstehen, kann ebenso Abwasser während des Produktionsprozesses aus den Ausgangsstoffen entstehen. Auch die Zusammensetzung des Schmutzwassers ist stark branchenabhängig. Generell kann das Abwasser mit organischen und anorganischen Stoffen in ungelöster, dispers-gelöster oder echt gelöster Form verschmutzt sein (ATV, 1999).

Als abwasserproduzierende Industriezweige sind die Lebensmittelindustrie, Tierkörperbeseitigungsanlagen, Holzverarbeitungs-, Zellstoff-, Papier- und Pappfabriken sowie die pharmazeutische Industrie und lederherstellende Betriebe zu nennen. Da sowohl die Zusammensetzung des Abwassers als auch die Frachten stark variieren, unterscheiden sich auch die Behandlungsverfahren zur Reinigung des industriellen Abwassers. Dabei spielen unter anderem der pH-Wert, die Temperatur, CSB und BSB₅ sowie deren Verhältnis zueinander, Stickstoff- und Phosphorfrachten als auch der Salzgehalt und das Vorkommen von Säuren und Schwermetallen eine Rolle. Repräsentative Werte für einige Parameter sind in Tabelle 4 gegeben.

Tabelle 4: Beispielhafte Zusammensetzung verschiedener Industrieabwässer (Quelle: Böhnke et al., 1993)

	CSB [mg/l]	NH ₄ -N [mg/l]	pH
Molkereiabwasser	700 - 3.000	k.A.	9 - 10,5
Schlachthofabwasser	1.000 - 6.000	200 - 300	k.A.
Abwasser aus TBA*	4.000 - 15.000	600 - 1.700	6,5 - 8,5

* TBA = Tierkörperbeseitigungsanlagen

Nach Böhnke et al. (1993) ergeben sich für Molkereiabwässer CSB-Konzentrationen von 700 bis 3.000 mg/l, bei Schlachthofabwässern hingegen nimmt der CSB Werte von 1.000 bis 6.000 mg/l an und Abwasser aus Tierkörperbeseitigungsanlagen weist CSB-Konzentrationen von 4.000 bis 15.000 mg/l CSB auf. Auch in der Ammoniumkonzentration ergeben sich deutliche Unterschiede mit Werten von 200 bis 300 mg/l für Schlachthofabwässer und 600 bis 1.700 mg/l für Tierkörperbeseitigungsanlagen. Der pH-Wert zeigt grundsätzlich Schwankungen auf, für Molkereiabwasser liegen diese zwischen 9 und 10,5 und für Abwasser aus Tierbeseitigungsanlagen zwischen 6,5 und 8,5 (Böhnke et al., 1993).

Laut eines Forschungsberichts des Umweltbundesamtes aus dem Jahr 2006 (Haber Kern et al., 2008) gibt es in Deutschland rund 10.200 Kläranlagen mit insgesamt etwa 126 Millionen angeschlossenen Einwohnerwerten und einem Gesamtstromverbrauch von 4.400 GWh pro Jahr. Der spezifische Stromverbrauch ist bei Kläranlagen der Größenklasse 1 am höchsten und nimmt mit zunehmender Größe der Kläranlage ab. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass der Schwankungsbereich der Werte bei kleineren Kläranlagen sehr viel größer ist als bei größeren Anlagen. Dies liegt zum Teil an schlechteren Wirkungsgraden von kleineren Motoren und Pumpen, hauptsächlich jedoch an einem stärkeren Einfluss von Sonderaggregaten (Haber Kern et al., 2008).

Bei Kläranlagen, die zur Reinigung des Abwassers das Belebungsverfahren verwenden, ist die Belüftung der mit Abstand größte Stromverbraucher und bietet damit das höchste Potential für Energieeinsparmaßnahmen (siehe Abbildung 11).

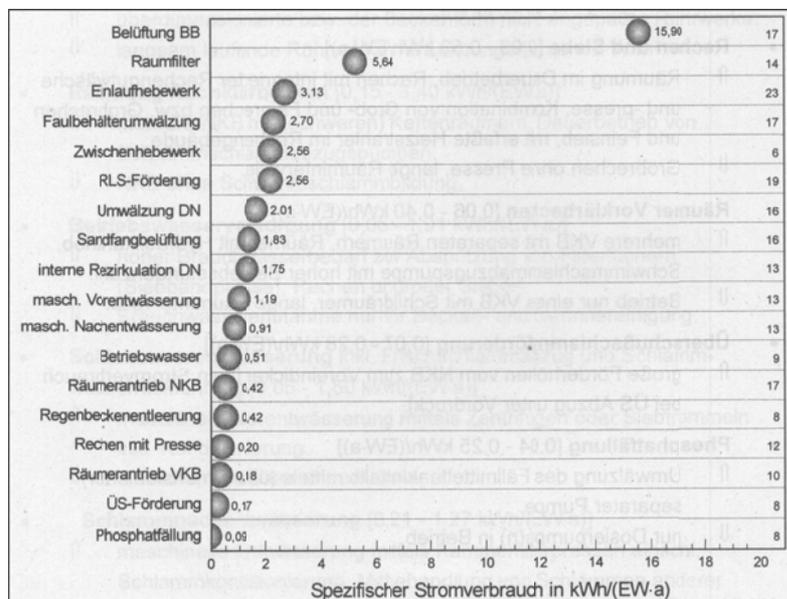


Abbildung 11: Mittlerer Stromverbrauch von Anlagenteilen in GK4 und 5 (Quelle: Haberkern et al., 2008)

Mehr als ein Drittel des Stromverbrauchs der Kläranlagen in Deutschland wird durch industriell-gewerbliches Abwasser verursacht (Haber Kern et al., 2008). Der Abwasseranfall hängt jedoch im Wesentlichen vom eingesetzten Produktionsverfahren ab und kann je nach Industriezweig wie auch innerhalb einer Branche stark variieren, was sich auch in den unterschiedlichen Anforderungen an die Einleiterwerte in der Abwasserverordnung widerspiegelt. Eine individuelle Reinigungsstrategie für jedes Abwasser ist erforderlich und somit kann kein pauschaler Wert für den Energieverbrauch für industrielle Kläranlagen genannt werden.

6.1.2 Pilotanlage mit Luftsauerstoff und Reinsauerstoff im Vergleich

Auf Basis der Ergebnisse aus Kapitel 5 (siehe Abbildung 9) konnte eine Energieeinsparung für den vorliegenden Anwendungsfall nicht erzielt werden. Unter anderem lag dies daran, dass das Abwasser eine geringe Pufferkapazität aufwies und so ein Absinken des pH-Wertes in einen für die Nitrifikation ungünstigen Bereich durch die Ausstrippung von CO_2 vermieden werden musste.

Die Bakterienatmung im Belebungsbecken setzt Kohlenstoffdioxid (CO_2) frei, das sich im Abwasser löst. Bei konventioneller Belüftung reicht im Normalfall das eingeblasene Gasvolumen aus, um das CO_2 über den Strippeffekt auszutragen. Geschieht dies nicht, kann sich ein für die Nitrifikanten ungünstiger pH-Wert unter 6,6 einstellen, was auch in Beckentiefen über 6 m beobachtet wurde (ATV, 2000). Ist die Pufferkapazität des Abwassers nicht ausreichend oder der pH-Wert des Zuflusses von vornherein niedrig, wird eine Hemmung der Aktivität der Nitrifikanten schneller erreicht. Da durch den Einsatz der Reinsauerstoffbegasung das zur Sauerstoffversorgung der aeroben Organismen einzutragende Gasvolumen verglichen mit konventioneller Belüftung deutlich geringer ausfällt, ist auch die Menge an ausgetragenem Kohlendioxid entsprechend geringer. Um das Absinken des pH-Wertes zu verhindern, wurde auf der Kläranlage der EFG eine Anpassung der Reinsauerstoffbelüftung an die abwasserspezifischen Randbedingungen erforderlich. Dazu wurde das erforderliche Gasvolumen zum Strippen des Kohlenstoffdioxids berechnet mit dem Ergebnis, dass ein Belüfter des vorhandenen konventionellen Eintragungssystems alle 30 Minuten für acht Minuten zusätzlich zur Reinsauerstoffbegasung angeschaltet werden muss. So konnte der pH-Wert ohne die teure Zudosierung von Chemikalien in einem gewünschten Bereich gehalten werden.

Ein weiterer Grund liegt in der schlechteren Anpassung der VSA-Anlage an den betriebsbedingt schwankenden Sauerstoffbedarf an den Arbeitstagen und den wesentlich geringeren Sauerstoffbedarf an Wochenenden. Während der Stromverbrauch der konventionellen Belüftung an den Wochenenden meistens deutlich unterhalb von 500 kWh/d liegt, ist der Systemstromverbrauch für den Reinsauerstoffeintrag weit oberhalb von 1.000 kWh/d. Dies spiegelt sich ebenfalls in dem im Belebungsbecken II gelösten Sauerstoff wider (siehe Abbildung 8). Die Sauerstoffkonzentration lag an den Wochenenden im Belebungsbecken II im Tagesmittel häufig oberhalb von 4 mg/l. Hierbei ist anzumerken, dass die Messwertgrenze bei 5 mg/l lag und höhere Werte nicht aufgezeichnet werden konnten. Deutlich höhere tatsächliche Sauerstoffkonzentrationen im Tagesmittel sind daher wahrscheinlich. Da die Umsatzgeschwindigkeit der Nitrifikanten oberhalb von 2 mg/l jedoch nur sehr gering zunimmt (siehe DWA, 2006), wurde unnötig viel Sauerstoff in das System eingetragen, was zu einem deutlich höheren Energieverbrauch im Vergleich zur konventionellen Anlage beigetragen hat. Abhilfe könnte eine steuerungstechnische Anpassung der VSA-Anlage an den schwankenden Sauerstoffbedarf oder ein Ausgleich des Zulaufs z. B. durch ein vorgeschaltetes Ausgleichsbecken schaffen. Dieses müsste jedoch mindestens für einen Tagesausgleich ausgelegt sein, was wiederum zu Geruchsemissionen durch das schnell faulende Abwasser führen kann (siehe Kapitel 4.1).

Des Weiteren besitzt die eingesetzte VSA-Anlage einen schlechten Teillastwirkungsgrad, da sie für einen konstanten Volllastbetrieb entwickelt wurde. So beträgt nach Aussage des Herstellers AirProducts der Stromverbrauch 75 % bei einer Teillast von 50 %. Ebenfalls benötigt die Anlage einen längeren Betrieb (ca. mehr als eine Stunde), bis die Volllast von 100 % und damit die beste Energieeffizienz (d. h. geringstes Verhältnis von Stromverbrauch und produzierter Sauerstoffmenge) erreicht werden kann. Im vorliegenden Anwendungsfall wurde durch den intermittierenden Betrieb des Belebungsbeckens ein konstanter Betrieb nicht möglich, so dass die VSA-Anlage nicht im optimalen Betriebspunkt gelaufen ist.

Darüber hinaus wirkt sich der schwankende Beckenfüllstand (siehe Abbildung 6) in größerem Maße negativ auf die bis zu zwei Meter oberhalb der Beckensohle installierten Eintragungssysteme in Belebungsbecken II im Vergleich zu dem konventionellen Belüftungssystem, das flächig direkt am Grund des Belebungsbeckens I liegt, aus. Der minimale Beckenfüllstand in Belebungsbecken II lag im Versuchszeitraum bei 3,7 m. Folglich befand sich bei minimalem Beckenfüllstand eines der Eintragungssysteme nur 1,7 m unterhalb der Wasseroberfläche. Ein geringeres hydrostatisches Druckniveau und eine kürzere Verweilzeit der Gasblasen im System wirken sich negativ auf den Sauerstoffeintrag in das Belebungsbecken II aus (siehe Kapitel 3.3).

Tabelle 5: Bewertung der möglichen Energieeinsparungen unter optimalen Einsatzbedingungen der VSA-Anlage

Anpassungsbereich	Korrekturfaktor
Ausstrippung von CO ₂	0,975
Schwankender Beckenfüllstand	0,858
Sauerstoffeintrag orientiert sich an Zulauffracht	0,971
Synchophage Effects	0,972
Generelle Systemverbesserungen	0,769
Multiplikation der Korrekturfaktoren	0,607

In Tabelle 5 ist eine Bewertung der möglichen Energieeinsparungen unter optimalen Einsatzbedingungen dargestellt. Im Ergebnis berechnet sich ein möglicher Energieeinsparfaktor von 0,607 unter optimalen Einsatzbedingungen einer VSA-Anlage. Unter optimalen Einsatzbedingungen reduzierte sich demnach der mittlere tägliche Stromverbrauch auf $0,607 \cdot 1.324,5 \text{ kWh/d} = 804 \text{ kWh/d}$ und läge dann unterhalb des Energieverbrauchs der konventionellen Anlage mit 1.031,2 kWh/d. Eine Energieeinsparung gegenüber einer konventionell belüfteten Anlage ist folglich mit einer Reinsauerstoffbegasung unter optimalen Einsatzbedingungen möglich.

6.2 Reduzierung Reststoffanfall

Generell kann bei der Verwendung von Reinsauerstoff zur Sauerstoffversorgung des Belebungsbeckens im Vergleich zur herkömmlichen Versorgung mit Luftsauerstoff von einer Reduzierung des Reststoffanfalls ausgegangen werden. Durch den höheren Sauerstoffpartialdruck werden auch tiefere Schichten der Belebtschlammflocken mit Sauerstoff versorgt und nehmen am aeroben Abbau teil, wodurch die Überschussschlammproduktion sinkt (Stark, 2004).

Beim vorliegenden Pilotprojekt lässt sich eine Verringerung der Überschussschlammproduktion jedoch nicht nachweisen, da die Überschussschlammengen der beiden Belebungsbecken nicht getrennt voneinander erfasst wurden. Darüber hinaus wurde das Belebungsbecken II nicht ausschließlich mit Reinsauerstoff begast, sondern zur Ausstrippung von CO₂ im Hybridbetrieb mit der konventionellen Belüftung betrieben. Daher ist ein Vergleich der Belüftungssysteme nicht möglich. Vom Kläranlagenpersonal wurde jedoch eine Veränderung des Belebtschlammes über den Versuchszeitraum geschildert, hin zu kleineren und kompakteren Belebtschlammflocken. Mikroskopische Untersuchungen ließen zudem eine geringere Fädigkeit der Belebtschlammflocken im Belebungsbecken II erkennen (siehe Abbildung 12, 1 Einheit = 9,4 µm).

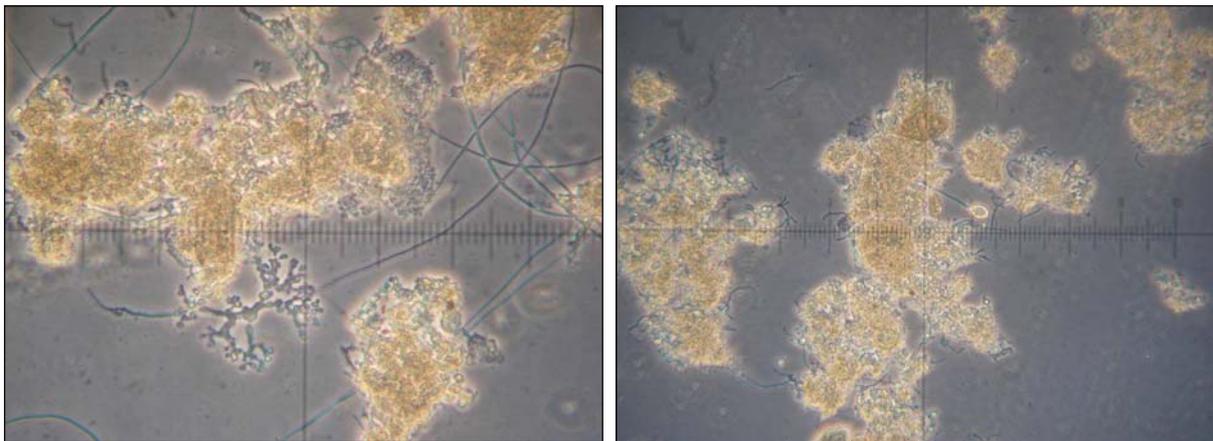


Abbildung 12: Mikroskopische Aufnahme Belebungsbecken I (links) und II (rechts)

Diese Beobachtung wird auch durch den Vergleich der Schlammvolumenindices bestätigt (siehe Abbildung 8). Durch ein höheres Oberflächen-Volumen-Verhältnis setzen sich die fadenförmigen Bakterien im Vergleich zu kompakteren Belebtschlammflocken im Nachklärbecken und in statischen Eindickern schlechter ab (Schmitt et al., 2003). Daraus resultiert ein größeres Überschussschlammvolumen und es besteht die Gefahr von Schlammabtrieb, sollte zur Nachklärung ein Absetzbecken verwendet werden. Im vorliegenden Anwendungsfall wird jedoch eine Nachklärflotation betrieben, so dass sich ein besseres Absetzverhalten des Schlammes nicht vorteilhaft auswirkt.

6.3 Aerosol- und Geruchsemissionen

Laut Posch (1999) sind Aerosole feste oder flüssige Stoffe, die in einem gasförmigen Dispersionsmittel (z. B. Luft) sehr fein verteilt sind. Aerosolemissionen aus Kläranlagen spielen in zweierlei Hinsicht eine Rolle. Zum einen sind sie Träger der im Abwasser enthaltenen Krankheitserreger und bilden somit vor allem für das Kläranlagenpersonal ein Infektionsrisiko. Zum anderen begünstigen sie den Transport von Geruchsstoffen (ATV, 1996). Gesundheitsgefährdung und eventuelle Geruchsbelästigungen steigen mit zunehmender Menge an Aerosolen. Die Menge der Aerosolemissionen ist in starkem Maße abhängig von der Belüftungseinrichtung und den damit verbundenen Strippeffekten, der Sauerstoffausnutzung im Belebungsbecken sowie der Beckenoberfläche und der Abwasserturbulenz. Geringere Strippeffekte, die sich durch ein bis zu einem Fünftel geringeres einzutragendes Gasvolumen durch die Verwendung von Reinsauerstoff im Vergleich zu Luft ergeben können, relativieren sich im vorliegenden Anwendungsfall durch den Hybridbetrieb mit der konventionellen Belüftung zur Strippung von Kohlenstoffdioxid. Die Bildung geruchsaktiver Substanzen im Abwasser setzt zumeist anaerobe Verhältnisse voraus. ATV (1996) erklärt die relative Größe der anaeroben Kernzone in einer Schlammflocke zum Maß für die Intensität der Geruchsstoffbildung. Die relative Größe der anaeroben Kernzone einer Belebtschlammflocke ist unter anderem abhängig vom Sauerstoffgehalt im umgebenden Abwasser und von der Form und Größe der Schlammflocke.

Bei Begehungen der Kläranlage waren dem subjektiven Eindruck nach keine Veränderungen feststellbar. Genauere Messungen zu den Aerosolemissionen wurden nicht durchgeführt. Da der Sauerstoffgehalt in Belebungsbecken II höher war (siehe Abbildung 8) und die Belebtschlammflocken kompakter (siehe Kapitel 6.2), ist dort eine geringere Geruchsstoffbildung und geringere Aerosolemissionen zu erwarten. Des Weiteren wurde eine geringere Schaumbildung auf Belebungsbecken II beobachtet. Dies ist auf die geringeren Begasungsmengen während des Stillstandes der konventionellen Belüftungsphasen und den kleineren Gasblasen bei der Reinsauerstoffbelüftung zurückzuführen.



Abbildung 13: Schaumbildung bei konventioneller Belüftung (links) und Reinsauerstoffbegasung (rechts)

6.4 Klimaschädliche Emissionen

Im Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen, das 2005 in Kraft trat, sind folgende Gase mit Auswirkung auf den Treibhauseffekt genannt: Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Distickstoffoxid (N_2O), Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFC), Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFC) und Schwefelhexafluorid (SF_6). Um verschiedene Emissionen bezüglich ihrer Klimaschädlichkeit vergleichbar zu machen, wird die Einheit CO_2 -Äquivalent genutzt. Im Zuge der biologischen Abwasserbehandlung sowie der anschließenden Schlammbehandlung entstehen unter bestimmten Milieubedingungen neben Kohlenstoffdioxid Methan und Distickstoffoxid, die ein höheres Treibhausgaspotential verglichen mit Kohlenstoffdioxid besitzen. Das Treibhausgaspotential von Methan entspricht 25 CO_2 -Äquivalenten und von Distickstoffoxid 298 CO_2 -Äquivalenten (Cuhls et al., 2011). Die Umrechnung des Stromverbrauchs für die verwendeten Abwasser- und Schlammbehandlungsverfahren in CO_2 -Äquivalente ist abhängig vom Anteil an regenerativen Energiequellen am verwendeten Strommix. Durch die Verstromung von Biogas und die Verbrennung von Klärschlamm lassen sich jedoch auch CO_2 -Gutschriften erzielen. Allerdings müssen der Energiebedarf für Aufbereitungstechniken und Emissionen aus der Entsorgung des Klärschlammes berücksichtigt werden. Vorausgesetzt, dass das CO_2 spätestens im Vorfluter freigesetzt wird, kann auch bei Einsatz von Chemikalien zur CO_2 -Bindung von einer gleich hohen CO_2 -Emission bei beiden Verfahren (konventionelle Belüftung und Reinsauerstoffbegasung) ausgegangen werden. Da bei dem vorliegenden Projekt im Vergleich zu der konventionellen Fahrweise keine Energieeinsparung realisiert werden konnte, ließen sich in dieser Hinsicht keine klimaschädlichen Emissionen vermeiden.

Der Einsatz von Reinsauerstoff bewirkte jedoch eine Reduzierung des Überschussschlammanfalls (siehe Kapitel 6.2), so dass jegliche Energieaufwendungen zur weiteren Schlammbehandlung geringer ausfallen. Eine Verringerung der Überschussschlammmenge kann jedoch nicht nachgewiesen werden, da die Überschussschlammmengen der beiden Belebungsbecken nicht getrennt voneinander erfasst wurden. Eine Quantifizierung der Einsparung klimaschädlicher Emissionen aufgrund von verringerten Überschussschlammmengen ist daher nicht möglich.

6.5 Leistungssteigerung und Prozessstabilität

Die Prozessstabilität einer Abwasserreinigungsanlage ist im Zusammenhang mit den einzuhaltenden Überwachungswerten zu betrachten (von Hagel et al., 1996). Abbildung 10 belegt, dass die geforderten Grenzwerte während des gesamten Versuchszeitraums deutlich unterschritten wurden und zumeist unterhalb der Einleiterwerte der konventionell betriebenen Straße der Kläranlage lagen. Diese Werte ließen sich jedoch nur erreichen, indem der pH-Wert durch die zusätzliche Ausstrippung von Kohlenstoffdioxid durch die konventionelle Belüftung angehoben wurde. Ohne diese Anpassung wäre die Prozessstabilität aufgrund der

geringen Pufferkapazität des zu behandelnden Abwassers bezüglich des pH-Wertes nicht gewährleistet, da das Leistungsoptimum der Nitrifikanten im pH-Bereich von 7,5 bis 8,5 liegt (Hänel, 1986). Der pH-Wert in Belebungsbecken II lag im Versuchszeitraum im Durchschnitt bei 6,58 (siehe Abbildung 7) und somit deutlich unterhalb des Optimalbereichs nach ATV (2000). Eine weitere Anhebung des pH-Wertes durch geeignete Maßnahmen (z. B. Zugabe von Kalk, Soda oder Natronlauge) kann zu einer Leistungssteigerung der Belebung führen.

Die Prozessstabilität wird im vorliegenden Anwendungsfall durch den schwankenden Beckenfüllstand zusätzlich beeinträchtigt, da dies den Sauerstoffeintrag beeinflusst (siehe Kapitel 3.3). Bei einem gleich bleibenden Niveau ließen sich die Eintragungssysteme besser auf einen optimalen Sauerstofftrag im Belebungsbecken einstellen und damit die Prozessstabilität erhöhen.

Der niedrigere Schlammvolumenindex im Belebungsbecken II bewirkt ein besseres Absetzen der Belebtschlammflocken. Im Falle eines Absetzbeckens zur Nachklärung bringt dieser Effekt Vorteile durch eine Leistungssteigerung einer mechanischen Nachklärung mit sich. Dann lässt sich auch das Belebungsbecken mit einem höheren Schlammgehalt betreiben. Im vorliegenden Anwendungsfall wird jedoch eine Nachklärflotation betrieben, die durch einen niedrigeren ISV nicht beeinflusst wird. In Kombination mit dem höheren Sauerstoffgehalt im Belebungsbecken II (siehe Abbildung 8) ergibt sich eine höhere Bioaktivität und somit eine Leistungssteigerung der Belebung. Bei Spitzenbelastungen wurde die Kapazität der VSA-Anlage zu etwa 90 % beansprucht. Folglich liegt auch hier noch ein Spielraum zu einer Leistungssteigerung vor.

6.6 Kosten

Durch die Reinsauerstoffbegasung des Belebungsbeckens II ließ sich unter den vorliegenden Randbedingungen der Stromverbrauch im Vergleich zu der konventionellen Belüftung nicht reduzieren. Demnach ist eine Amortisation der zusätzlichen Investitionen auf der Kläranlage der EFG für die VSA-Anlage, das Fundament für deren Aufstellung, die Steuerungstechnik und die Eintragungssysteme sowie deren Installation nicht über eine Einsparung an Energiekosten zur Sauerstoffversorgung zu erreichen. In Kapitel 6.1.2 ist jedoch dargestellt, dass eine Energieeinsparung unter optimalen Einsatzbedingungen gegenüber einer konventionell belüfteten Anlage realisiert werden kann. Unter optimalen Einsatzbedingungen ist daher eine Amortisation der zusätzlichen Investitionen für die Installation einer Reinsauerstoffbegasung möglich.

Aufgrund einer geringeren Überschussschlammmenge reduzieren sich jedoch die Entsorgungskosten für den Überschussschlamm. Die Höhe dieser Einsparung ließ sich jedoch nicht feststellen, da die Überschussschlammengen der beiden Belebungsbecken nicht ge-

trennt voneinander erfasst wurden und die Energieaufwendungen zur Schlammbehandlung ebenfalls nicht dokumentiert sind.

Um den konventionellen Betrieb und das Reinsauerstoffverfahren vergleichbar zu machen, muss zusätzlich deren Reinigungsleistung betrachtet werden. Diese ließe sich in Belebungsbecken II aufgrund des geringeren ISV und dem höheren Sauerstoffgehalt erhöhen, indem der Schlammgehalt erhöht wird. Dazu wurden jedoch keine Versuche durchgeführt. Laut Böhnke et al. (1979) lässt sich bei Reinsauerstoffanlagen im Vergleich zu luftbegasteten Anlagen, bei einer Schlammbelastung, die um den Faktor zwei und einer Raumbelastung, die um den Faktor drei höher ist, die gleiche Reinigungsleistung erzielen. Im Falle eines Absetzbeckens zur Nachklärung lässt sich durch den geringeren ISV und die damit verbundene Beschleunigung des Absetzverhaltens der Belebtschlammflocken der Fällmittelbedarf und die damit verbundenen Kosten reduzieren.

Generell wird eine reinsauerstoffbegaste Anlage einen Kostenvorteil gegenüber einer konventionell belüfteten Anlage haben, wenn sich sämtliche Vorteile der Reinsauerstoffbegasung nutzen lassen (siehe Kapitel 3.4). Dies sind ein geringerer Platzbedarf für Belebungsbecken und Nachklärung, geringe Geruchs- und Lärmemissionen, eine hohe Sauerstoffzufuhr, ein niedriger Schlammvolumenindex und eine reduzierte Überschussschlammproduktion im Vergleich zu luftbegasteten Anlagen.

Bei der Betrachtung der Kosten ist es wichtig zu unterscheiden, ob es sich um den Vergleich zweier Varianten, also Reinsauerstoff- oder Luftbegasung, zum geplanten Neubau einer Anlage handelt, oder ob eine im Betrieb befindliche konventionell belüftete Anlage durch den Einsatz von Reinsauerstoff optimiert werden soll. Im zweiten Fall muss geprüft werden, inwiefern sich die Reinsauerstoffbegasung in die vorhandene Anlage integrieren lässt und ob sich durch ihren Einsatz deren Erweiterung vermeiden lässt. Denkbar ist, den bei der Luftzerlegung anfallenden Stickstoff an Industrieunternehmen zu verkaufen, die diesen für ihre Produktion benötigen. Zusätzliche Kosten ergeben sich, werden für den Eintrag des Reinsauerstoffs Oberflächenbelüfter genutzt, da es bei diesen Anwendungen nötig wird, das Belebungsbecken gasdicht abzudecken. Dazu kommen Sicherheitsvorkehrungen, die beim Umgang mit Reinsauerstoff eingehalten werden müssen. Diese fallen jedoch bei der VSA-Anlage im Vergleich zur Bevorratung von flüssigem Sauerstoff in Speichertanks geringer aus, da der Sauerstoff nur bei Bedarf produziert wird. Weitere Kostenvorteile der Vor-Ort-Erzeugung von Reinsauerstoff im Vergleich zur Belieferung durch ein Gasunternehmen ergeben sich aus dem Wegfall von logistischen Problemen und der Unabhängigkeit von Lieferverträgen.

Ein Kostenvergleich zwischen Vor-Ort-Herstellung und Lieferung von Reinsauerstoff zeigt in Abhängigkeit von der Lieferdistanz, der Stromversorgungssicherheit, der Marktbedingungen und länderspezifischen Abweichungen im Allgemeinen eine mögliche Kosteneinsparung von 20 bis 50 % bei Vor-Ort-Herstellung, wenn alle Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten berücksichtigt werden.

7 Ergebnisverwertung

7.1 Ziele

Im Antrag zu diesem Projekt wurden folgende Ziele definiert:

„Als mittelständischer Ausrüster von kommunalen und industriellen Kläranlagen mit dem Schwerpunkt auf biologischen Abwasserreinigungsverfahren muss die HST Hydro-Systemtechnik GmbH dem zunehmenden Preiswettbewerb in Deutschland und der Notwendigkeit einer internationalen Expansion durch immer neue und marktfähige Innovationen begegnen. Insbesondere der Preisdruck im Wettbewerb mit in- und ausländischen Konkurrenten macht es erforderlich, intelligente, Energie und Kosten sparende technische Lösungen zu entwickeln und als Alternative anzubieten. Mit der neuen, energiesparenden Belüftungstechnologie soll die HST Hydro-Systemtechnik GmbH in die Lage versetzt werden, ihre Marktposition als Kläranlagenausrüster zu festigen sowie international auszubauen. Der HST Hydro-Systemtechnik GmbH ist kein Wettbewerber bekannt, der diese oder eine vergleichbare Technologie einsetzt, um Energieeinsparungen in den genannten Größenordnungen erzielen zu können“.

Die im Zuge des Projektes durchgeführte Marktanalyse (siehe 7.2) hat gezeigt, dass es ein ausreichendes Interesse und potenziellen Bedarf für die Anwendung von Reinsauerstoff gibt. Die Vorteile von vor Ort erzeugtem Reinsauerstoff im Vergleich zu bis dato eingesetzten Lösungen mit Flüssigsauerstoff wurden auf Seiten der Anwender positiv eingeschätzt. Parallel zum Projekt wurden die durch die Marktanalyse generierten Anfragen bearbeitet. Dabei zeigte sich, dass sich die meisten Anwendungen in einem Leistungsbereich von 500 bis 2000 kg Reinsauerstoff pro Tag bewegten. Mit Start des Projektes bot Air Products als einziges Unternehmen Reinsauerstoffherstellungsmaschinen an mit den Größen 262 kg/d, 872 kg/d und 5000 kg/d. Hinzu sollten noch weitere Größen zwischen 1000 und 5000 kg/d kommen, so dass das avisierte Marktsegment von 500 bis 2000 kg Reinsauerstoff pro Tag gut bedient werden konnte.

7.2 Marktanalyse und Markteinführung im Abwassersektor

Zur Feststellung eines ausreichend vorhandenen Marktpotenzials wurde im Jahr 2008 eine schriftliche Befragung von Unternehmen aus ausgewählten Industriezweigen mit Unterstützung des IEEM sowie Einzelinterviews mit Marktexperten durchgeführt. Zuvor wurden basierend auf den Ergebnissen einer Besucherbefragung der HST auf der IFAT 2005 sowie mehreren Befragungen innerhalb des Kooperationsprojektes MOTES [siehe BECKER 2005] entsprechende Fragen formuliert.

Die Fragen und Antworten lauteten:

1. Welche Form der biologischen Abwasserbehandlung liegt bei Ihnen vor?

Kind	Municipal market		Industrial market	
	Numbers	Percentage	Numbers	Percentage
Activated sludge system	60	88 %	6	35 %
Moving bed system	4	5 %	1	6 %
SBR	2	3 %	6	35 %
Anaerobic System	1	2 %	2	12 %
Others	1	2 %	2	12 %

2. Welche Form der Belüftung setzen Sie ein?

Kind	Municipal market		Industrial market	
	Numbers	Percentage	Numbers	Percentage
fine bubble aeration	50	68 %	9	60 %
Jet system	1	1 %	2	13 %
Ozone	0	0	0	0
Surface aeration system	15	20 %	1	7 %
Pure Oxygen	5	7 %	2	13 %
Others	3	4 %	1	7 %

3. Welche Entscheidungskriterien waren für die Wahl Ihres Belüftungssystems ausschlaggebend (höchste Bewertung entspricht höchste Wichtigkeit)?

Kind	Municipal market			Industrial market		
	Points	Value	Ø	Points	Value	Ø
Low investment	148	37	4,0	20	7	2,9
Approved technology	113	45	2,5	22	10	2,2
Low operational costs	123	36	3,4	20	7	2,9
High economical efficiency	148	35	4,2	23	7	3,3
High grade of steering	135	36	3,8	28	7	4,0
Innovation	181	29	6,2	31	6	5,2
Proposal of consultants	149	42	3,5	37	9	4,1
Saving of power consumption	156	33	4,7	27	5	5,4
Others	-	4	-	-	0	-

4. Welche Entscheidungskriterien wären für Sie heute bei der Wahl eines neuen Belüftungssystems ausschlaggebend?

Kind	Municipal market			Industrial market		
	Points	Value	Ø	Points	Value	Ø
Low investment	172	46	3,7	29	9	3,2
Approved technology	175	44	4,0	24	9	2,7
Low operational costs	115	54	2,1	21	10	2,1
High economical efficiency	144	48	3,0	21	9	2,3
High grade of steering	177	45	3,9	32	8	4,0
Innovation	223	37	6,0	26	4	6,5
Proposal of consultants	265	39	6,8	38	5	7,6
Saving of power consumption	158	47	3,4	27	7	3,9
Others	-	3	-	29	9	3,2

5. Welche Themenschwerpunkte sind derzeit auf Ihrer Kläranlage an erster Stelle zu bearbeiten bzw. zu lösen?

Kind	Municipal market			Industrial market		
	Points	Value	Ø	Points	Value	Ø
Reducing energy costs	130	50	2,6	18	7	2,6
Reducing sludge quantity	185	45	4,1	23	9	2,6
Rising capacity	224	40	5,6	33	7	4,7
Reducing output limit	219	42	5,2	32	7	4,6
Reducing operational costs	101	51	2,0	13	8	1,6
Optimizing operations	126	49	2,6	20	5	4,0
Flexible control system	193	42	4,6	34	6	5,7
Others	-	4	-	-	2	-

6. Planen Sie eine Erneuerung/Ertüchtigung Ihres Belüftungssystems in absehbarer Zeit?

	Municipal market	Industrial market
Yes	15	2
No	43	11

7. Welche Kriterien sollte eine Technologie für Sie erfüllen, um Ihr bestehendes Belüftungssystem zu ertüchtigen bzw. in der Leistung zu verbessern?

Kind	Municipal market			Industrial market		
	Points	Value	Ø	Points	Value	Ø
Low investment	135	47	2,9	26	9	2,9
Quick amortisation	126	44	2,9	20	9	2,2
More capacity	205	41	5,0	41	10	4,1
Easy integration	153	42	3,6	28	9	3,1
Permanent low operational costs	97	55	1,8	23	12	1,9
Possibility to rent	234	39	6,0	41	7	5,9
Trial before buying	195	42	4,6	37	9	4,1
	-	4			0	

8. Welche Merkmale würden Sie vom Einsatz der Belüftung mit Reinsauerstoff überzeugen?

Kind	Municipal market			Industrial market		
	Points	Value	Ø	Points	Value	Ø
Permanent low operational costs	88	54	1,6	19	12	1,6
Quick amortisation	134	42	3,2	20	9	2,2
More capacity	224	41	5,5	34	9	3,8
Onsite production of O2	251	44	5,7	43	9	4,8
Reduce of surplus sludge	172	47	3,7	29	9	3,2
Possibility to rent	260	42	6,2	39	6	6,5
Trial before buying	225	45	5,0	31	8	3,9
Low energy consumption	156	51	3,1	38	11	3,5
Others	-	3	-		0	

9. Welche Merkmale würden Sie vom Einsatz der Belüftung mit Reinsauerstoff abhalten?

Kind	Municipal market			Industrial market		
	Points	Value	Ø	Points	Value	Ø
High investment	110	50	2,2	20	10	2,0
Liquid gas	181	46	3,9	24	9	2,7
High operational costs	89	53	1,7	22	10	2,2
Unfamiliar technology	185	42	4,4	24	6	4,0
Less Know-how	181	44	4,1	29	8	3,6
Higher requirements for safety	158	44	3,6	35	9	3,9
Others	-	5	-		0	

10. Wünschen Sie weitere Informationen zum Einsatz von Reinsauerstoff in der Abwasserbehandlung von einem unserer Partner aus der Wirtschaft?

	Municipal market	Industrial market
Yes	15	6
No	44	7

(Die Befragung erfolgte in Zusammenarbeit mit den Standorten Paris, Brüssel und Basinkstore von Air Products, der Abschlussbericht wurde in Englisch verfasst, die Tabellen sind Auszüge aus diesem Bericht).

Obwohl nur halb so viele Antworten aus der Industrie im Vergleich zum kommunalen Markt kamen und nur 20 % der Industrieantworten auswertbar waren, gab es durch die zahlreichen Übereinstimmungen zum kommunalen Markt verwertbare Aussagen hinsichtlich der angestrebten Ziele. Nachfolgend die wesentlichen Aussagen der Befragung.

In beiden Märkten waren in der Vergangenheit die Gründe für den Kauf von Belüftungssystemen, dass erprobte Systeme ausgewählt wurden. Maßgebend zum Zeitpunkt der Befragung in 2008 war das Hauptargument geringe Betriebskosten (siehe Fragen 3 und 4). Auch in Sachen zukünftige Hauptthematik (siehe Frage 5) haben beide Märkte mit der Reduzierung der Betriebskosten den identischen Fokus.

Diese Aussage wird hinsichtlich der Auswahl eines neuen Belüftungssystems (siehe Frage 7) unterstützt. In beiden Märkten ist es das Ziel, mit neuen Belüftungssystemen dauerhaft die Betriebskosten zu senken. So ergeben sich zwangsweise die Antworten der Fragen 8 und 9, wenn es um Für oder Wider neuer Belüftungssysteme geht. Die aktuellen Diskussionen in 2012 mit Industriekunden zeigen, dass das Thema Energie- und Betriebskosten nach wie vor ein Topthema ist.

In den Einzelinterviews mit Marktteilnehmern wurde deutlich, dass die Einführung neuer Technologien immer wieder an der Akzeptanz der Entscheider scheitert, etwas Neues auszuprobieren. Beim flüssigen Reinsauerstoff war eines der wichtigsten Gegenargumente die langfristige Abhängigkeit von einem Lieferanten, trotz der besseren Reinigungsergebnisse. Weitere Hindernisse werden in der Industrie vom mittleren Management darin gesehen, dass

neue Lösungen erst den Weg durch die oberen Managementinstanzen gehen müssen (was Monate dauern kann), so dass bereits vorliegende Entscheidungen z.B. für konventionelle Technik nicht mehr geändert werden, auch wenn eine neue Technik erhebliche Vorteile bringt. Alle Teilnehmer (kommunal und industriell) bestätigten zudem die zunehmende Wichtigkeit der Reduzierung von Betriebs- und Energiekosten. Dieser Trend hat sich bis heute (2012) nicht geändert und findet bei Industrieunternehmen in der zunehmenden Zertifizierung nach ISO 50001 seinen eindeutigen Ausdruck.

Neben den Aspekten zur Kostenreduzierung und einem Full-Service kam bei den Interviews heraus, dass speziell in der Industrie die persönliche Ansprache und die Kenntnis der Entscheidungswege (Wie sieht das sogenannte Buying-Center aus?) eine hohe Bedeutung haben, komplexe Lösungen und Produkte zu verkaufen. Der Vertrieb eines komplexen Produkts wie einer stationären Vor-Ort-Reinsauerstofferzeugung kann nur mit einem Key-Account für diesen speziellen Nischenmarkt erfolgen. Weiterhin muss der Verkaufspreis solcher Lösungen im Vergleich zu konventionellen Belüftungssystemen oder Lösungen mit flüssigem Reinsauerstoff stimmen. Dies war mit den Lösungen von Air Products in vielen Projektanfragen nicht der Fall.

Bisher ist es zu keiner Markteinführung der Reinsauerstofftechnik gekommen. Hierfür gibt es zwei wesentliche Gründe:

- die zuvor beschriebenen Verzögerungen im Projekt erlaubten keinen frühen Markteintritt, da die vorliegenden Ergebnisse als Argument für die neue Technologie nicht aussagekräftig genug waren
- bereits zu Beginn der Projektlaufzeit hat die US-Zentrale von Air Products entschieden, alle kleineren Aggregate der Vor-Ort-Reinsauerstofferzeugung aus dem Programm zu nehmen und nur noch die Gerätegröße 5000 kg/d am Markt zu platzieren. Andere Anbieter mit nachweislich erprobter und in Deutschland akzeptierter Technik in kleineren Größen waren nicht bekannt. Damit konnte HST mehr als 90 % der Anfragen und potenziellen Projekte nicht mehr bedienen.

Unter diesen Bedingungen war das Risiko für HST zu groß, die erforderlichen Investitionen für einen Markteintritt zu tätigen.

7.3 Produktverbreitungsstrategie

Vor der Entscheidung der Konzernzentrale von Air Products, nur noch eine Geräteklasse anzubieten, war die wesentliche Produktverbreitungsstrategie die Beschäftigung eines Key-Accounts für den Industriesektor. Klassische Marketingmaßnahmen wie Anzeigen oder Internetauftritt hätten einen kaum messbaren Erfolg gebracht. Das hat die Marktstudie deutlich gezeigt. Nachdem die Entscheidung der Konzernzentrale von Air Products feststand, nur die große Geräteklasse anzubieten, hat HST weitere Marktaktivitäten zurück gestellt und darauf

gewartet, ob aus den USA eine Änderung der Produktstrategie noch erfolgen würde oder nicht. Bislang ist hierzu kein anderes Signal von Air Products gekommen.

Nachdem nun die Ergebnisse der Versuche in Haren/Ems vorliegen, und die Bearbeitung dieses Projektes zu einem enormen Wissenszuwachs bei HST geführt hat, wird die Integration von Lösungsangeboten mit Reinsauerstoff aktuell noch einmal geprüft. Die vielen Gespräche und Angebotsbearbeitungen haben gezeigt, dass auch der flüssige Reinsauerstoff eine Lösungsoption sein kann, die HST als Bestandteil von Gesamtkonzepten zur industriellen Abwasserreinigung implementieren kann. Dieses Wissen soll als Sonderthema wieder in das Leistungsportfolio für die industrielle Abwasserreinigung mit aufgenommen werden.

Im kommunalen Markt ist der Anwendungsbereich von Reinsauerstoff zur Abwasserreinigung ein absolutes Randthema. Daher wird HST im kommunalen Sektor keine aktive Marktbearbeitung vornehmen. Sollte sich im Zuge anderweitiger Lösungsangebote heraus stellen, dass Reinsauerstoff eine Option darstellt, wird dies entsprechend angeboten.

7.4 Bericht über Maßnahmen zur Verbreitung der Projektergebnisse

Folgende Tabelle veranschaulicht die Maßnahmen zur Verbreitung der Projektergebnisse:

Nr.	Art der Verwertung	Zeithorizont
1	Präsentationen und Publikationen:	seit 2007 fortlaufend
2	Schlussbericht	2012
3	Veröffentlichung im Magazin Water Vision	geplant 2012
4	Technical Paper (zu veröffentlichen z. B. in Water 21)	geplant 2012
5	Veröffentlichung auf den Homepages der beteiligten Partner (HST, AirProducts, IEEM)	2012
6	Erstellung von Broschüren in Deutsch und Englisch, die auf Konferenzen oder Events wie z. B. der IFAT von den Projektpartnern verteilt werden	2012 ff.
7	Einbringung von Ergebnissen in Fachverbände: - BDE, VDMA, DWA, u. a.	2009 ff.
8	Veröffentlichung durch Vorträge auf Konferenzen, z. B. 2. Innovationsforum	2012 ff.

7.5 Schlussfolgerungen und Maßnahmen

Die Marktanalyse offenbarte, dass im Wesentlichen der industrielle Markt für derartige Lösungen interessant ist. Auch das von Air Products angestrebte Leasing der Reinsauerstoffmaschinen wird weitaus mehr im industriellen Sektor akzeptiert als im kommunalen Markt. Es zeigte sich bei den ersten Angeboten aber schnell, dass selbst der Industriesektor in den Jahren 2007-2009 wenig Interesse an Leasing zeigte, sondern vielmehr den Ankauf solcher Lösungen wünschte. Auf dieses Marktbedürfnis war Air Products nicht eingestellt, so dass erste Verkaufspreise alleine anhand der individuellen Projektkosten ermittelt wurden. Dies führte dazu, dass Kostenvergleiche mit vorhandenen Anlagen zur Reinsauerstofferzeugung aus Flüssigsauerstoff oder mit konventionellen Belüftungseinrichtungen zumeist ungünstig für die Reinsauerstofferzeugung vor Ort ausfielen, da der Investitionspreis auch bei längeren Laufzeiten sehr hoch war. Wie die aktuelle Akzeptanz von Leasing/Mietkauf ist, ist derzeit nicht bekannt.

Die im Zuge des Projektes durch die US-Zentrale getroffene Entscheidung, nur Maschinen mit 5000 kg/d anzubieten, erwies sich für die Marktstrategie der HST quasi als „Todesstoß“. Die Marktanalysen und die während des Projektes vorliegenden Anfragen zeigten auf, dass in mehr als 90 % der Projekte bei einem Tagesbedarf an Reinsauerstoff von 500 bis 2000 kg/d lagen. Für diesen Markt war (und ist) die zur Verfügung stehende Maschine zu groß und völlig unwirtschaftlich.

Der Markt für Maschinen mit 5000 kg/d als Teilkomponente ist für Abwasserinvestitionsprojekte von schätzungsweise > 5 Mio. € interessant und bewegt sich damit in einer Größenkategorie, die für ein mittelständisches Unternehmen wie HST nicht bedienbar ist.

Mittlerweile gibt es außerhalb von Deutschland Anbieter mit kleineren Aggregaten zur stationären Reinsauerstofferzeugung. Ob diese Maschinen technisch und leistungsbezogen gleichwertig sind mit der erprobten Technologie von Air Products kann aufgrund fehlender Erfahrung nicht beurteilt werden.

HST hat sich Ende 2011 entschlossen, wieder verstärkt im industriellen Sektor tätig zu werden und hat hierzu einen Key Account Industrie eingestellt. Damit konnte endlich eine wichtige Voraussetzung für eine erfolgreiche Markteinführung der Reinsauerstofftechnologie im Industriesektor geschaffen werden. Der neue Key Account wird den Bedarf der Industriekunden ermitteln. Wenn der Einsatz von Reinsauerstoff eine wirtschaftliche Alternative darstellt, wird HST diese Lösungsoption entweder als Flüssigreinsauerstoff- oder stationäre Reinsauerstofferzeugung anbieten.

8 Fazit

Die auf der Betriebskläranlage der Emsland Frischgeflügel GmbH in Haren/Ems eingesetzte VSA-Anlage zur stationären Erzeugung von Reinsauerstoff konnte nach anfänglichen Schwierigkeiten erfolgreich erprobt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz solcher VSA-Anlagen unter bestimmten Bedingungen wirtschaftlich sinnvoll ist und eine Energieeinsparung bewirken kann.

Im Zuge des Projektes haben sich leider einige Rahmenbedingungen offenbart, die sich für den Betrieb einer VSA-Anlage als nachteilig erwiesen haben. Dies waren in erster Linie ein schwankender Wasserspiegel im Belebungsbecken (sehr unüblich für Durchlaufsysteme, daher keine Abfrage im Vorfeld), der zu einer Reduzierung der Eintragsleistung geführt hat. Weiterhin ein niedriger pH-Wert im Zulauf, der ohne zusätzliche Mischenergie zur CO₂-Ausstrippung die Denitrifikation beeinträchtigt hat. Bei zukünftigen Anwendungen sollte daher im Vorfeld geprüft werden, ob das zu behandelnde Abwasser eine ausreichende Pufferkapazität bzw. bereits einen hohen pH-Wert besitzt.

Weitere festgestellte vorteilhafte Effekte wie bessere Schlammabsetzeigenschaften konnten nur labortechnisch ermittelt werden. Die ausgewählte Industriekläranlage verfügt als Nachklärung über Flotationen. Bei weiteren großtechnischen Untersuchungen sollte darauf geachtet werden, dass die Nachklärung als Absetzbecken ausgeführt ist, um sich die Vorteile eines geringeren Schlammvolumenindex bei Reinsauerstoffbegasung und der daraus resultierenden begünstigten Absetzbarkeit der Belebtschlammflocken zunutze zu machen.

Im vorliegenden Anwendungsfall können weitere Stromkosten dann eingespart werden, wenn durch eine optimierte Steuerungstechnik die Sauerstoffproduktion der VSA-Anlagen besser an den geringeren Sauerstoffbedarf an den Wochenenden angepasst wird. Weiterhin ist es von Vorteil, ein Belebungsbecken ohne Füllstandsschwankungen zu begasen oder ein an die Schwankungen besser angepasstes Eintragungssystem zu verwenden. Dabei ist auch auf eine günstige Beckengeometrie zu achten. Aufgrund des besseren spezifischen Energieverbrauchs bei Vollast der VSA-Anlage ist eine Belebung mit kontinuierlicher Belüftung statt intermittierender Denitrifikation für einen Vergleich beider Verfahren besser.

Um eine Aussage hinsichtlich der Überschussschlammproduktion zu treffen, sind in Zukunft die entsprechenden Mengen zu messen. Für eine geeignete Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer Anlage mit Reinsauerstoffbegasung im Vergleich zu einer Anlage mit konventioneller Belüftung sind weitere Messungen auf Kläranlagen mit anderen Randbedingungen durchzuführen.

Literaturverzeichnis

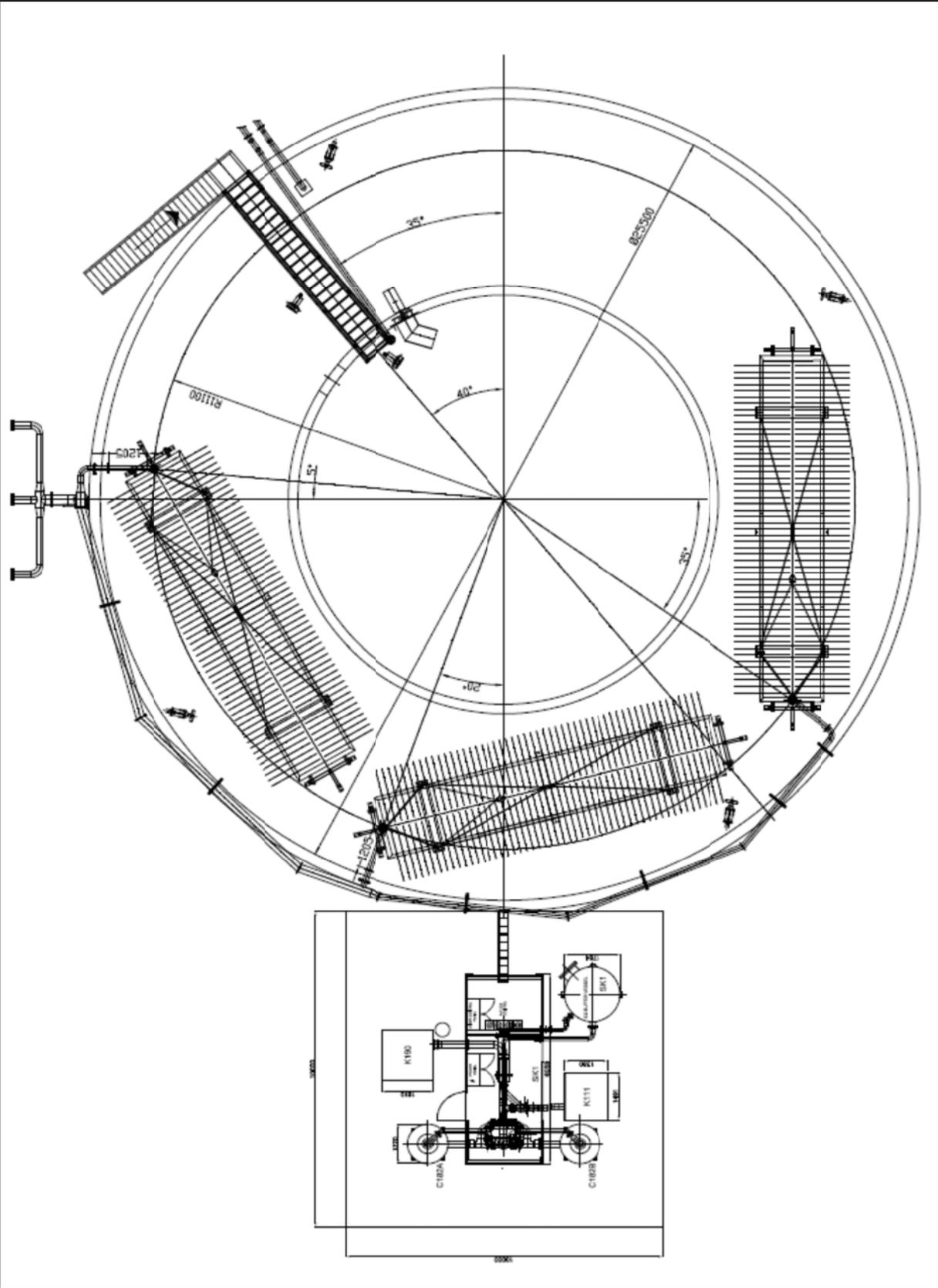
- Abw.VO (2004): Abwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), die zuletzt durch Artikel 20 des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585) geändert worden ist, Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer, Anhang 10 Fleischwirtschaft.
- ATV (1985): ATV-M 250 Maßnahmen zur Sauerstoffanreicherung von Oberflächengewässern. DVGW-Arbeitskreis "Maßnahmen zur Sauerstoffanreicherung von Oberflächengewässern" des DVGW-Hauptausschusses "Wassergüte und -aufarbeitung" unter Beteiligung der Abwassertechnischen Vereinigung e.V. (ATV), der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) und der Bundesanstalt für Gewässerkunde, September 1985.
- ATV (1992): ATV-M 767 Abwasser aus Schlacht- und Fleischverarbeitenden Betrieben, Januar 1992.
- ATV (1996): ATV-M 204 Stand und Anwendung der Emissionsminderungstechnik bei Kläranlagen – Gerüche, Aerosole. ATV-Regelwerk, Abwasser – Abfall, Oktober 1996, ISBN 3-927729-29-9.
- ATV (1997): ATV-Handbuch Biologische und weitergehende Abwasserreinigung, 4. Auflage, Ernst & Sohn, 1997, ISBN 3-433-01462-0.
- ATV (1999): ATV-Handbuch Industrieabwasser Grundlagen, 4. Auflage, Ernst & Sohn, 1999, ISBN 3-433-01464-7.
- ATV (2000): ATV-DVWK-A 131 Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen, Mai 2000, ISBN 3-933707-41-2.
- Berufsgenossenschaft Chemie (2008): Datenblatt Sauerstoff. GisChem, Information der BG Chemie, Juli 2008.
- Böcker, K.; Brandenburg, H.; Hiller, R.; Schröder, M. (2004): Energieeinsatz in Abwasseranlagen - Einsatz von Brennstoffzellen auf Kläranlagen. In: Korrespondenz Abwasser, Ausgabe 6/2004.
- Böhnke, B.; Gassen, M.; Bischofsberger, W.; Hegemann, W. (1979): Kläranlagen mit Sauerstoffbegasung in Deutschland. Herausgeber: Professor Dr.-Ing. B. Böhnke, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der Rhein.-Westf. Techn. Hochschule Aachen, Vertrieb: Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V., Aachen 1979, ISSN 0342-6068.
- Böhnke, B.; Bischofsberger, W.; Seyfried, C.F. (Hrsg., 1993): Anaerobtechnik, Handbuch der anaeroben Behandlung von Abwasser und Schlamm, Springer-Verlag, 1993, ISBN 3-540-56410-1.

-
- Brunner, C. (2010): Innovative Wasser- u. Abwasseraufbereitungstechnologie für kommunale und industrielle Abwässer und Prozesswässer. Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Berichte aus Energie- und Umweltforschung 75/2010.
- chemgapedia – <http://www.chemgapedia.de> [15.09.2011]
- Downie, N. A. (1997): Industrial Gases. Springer, 1st Edition 1997. ISBN: 9780751403527
- DWA-M 268 (2006): Steuerung und Regelung der Stickstoffelimination beim Belebungsverfahren. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Juni 2006.
- DWA-M 209 (2007): Messung der Sauerstoffzufuhr von Belüftungseinrichtungen in Belebungsanlagen in Reinwasser und in belebtem Schlamm. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., April 2007.
- Frey, W. (2006): Vergleichende Betrachtung der Betriebsergebnisse von Druck- und Oberflächenbelüftungssystemen in Österreich. Belüftung von Belebungsbecken; Osnabrück, Mai 2006.
- Friedrich, M.; Schmidt, M.; Küver, J; Schulz, H. H. (2004): Sulfidoxidation in kommunalem Abwasser. In Korrespondenz Abwasser, Ausgabe 9/2004.
- Gärtner, T.; Rudolph, K.-U. (1998): Kostensenkungsprogramm beim Neubau, Umbau und Betrieb von Kläranlagen, Handbuch Kommunales Abwasser (Hrsg.: C. W. Schmitz), S. 287 - 319. ISBN 3-87081-018-1
- Gegenmantel, H.-F. (1978): Untersuchungen zur Erzielung einer besseren Sauerstoffausnutzung bei horizontal rotierenden Wasserwalzen. Herausgeber: Professor Dr.-Ing. B. Böhnke, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der Rhein.-Westf. Techn. Hochschule Aachen, Vertrieb: Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V., Aachen 1978, ISSN 0342-6068.
- Greenwood, N. N.; Earnshaw, A. (1991): Chemie der Elemente, 1. Auflage, Springer, Berlin 1991, ISBN 3-540-58013-1.
- Haberkern, B.; Maier, W.; Schneider, U. (2008): Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen. Herausgeber: Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, März 2008.
- von Hagel, G.; Fathmann, H.; Kiefer, U.; Klopp, R.; Lemke, J.; Schmieder, E.; Spiller, K.; Stetzer, J. (1996): Grundlagen und Voraussetzungen zur Sicherung der Prozessstabilität von Abwasseranlagen. 2. Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 7.3.2 „Verfahrenssicherheit industrieller Abwasserbehandlungsanlagen“ im ATV-Fachausschuss 7.3 „Verfahrenstechnische Grundsatzfragen der industriellen Abwasserbehandlung“. In Korrespondenz Abwasser, Ausgabe 8/1996.

-
- Hänel, K. (1986): Biologische Abwasserreinigung mit Belebtschlamm. VEB Gustav Fischer Verlag Jena, ISBN 3-334-00023-0.
- Hansen, J., Steinmetz, H., Zettl, U. (1996): Betriebsergebnisse zum Einsatz der Reinsauerstoffbegasung zur weiter gehenden Stickstoffelimination bei einer Anlage mit Weinbaueinfluss, Abwassertechnik (awt), Heft 2, S. 32 – 36, 1996.
- Hegemann, W. (1974): Beitrag zur Anwendung von reinem Sauerstoff beim Belebungsverfahren, Technisch-wissenschaftliche Schriftenreihe der ATV, Bd. 3, 1974.
- Holleman; Wiberg (2007): Lehrbuch der Anorganischen Chemie, 102. Auflage, de Gruyter, Berlin 2007, ISBN 978-3-11-017770-1, S. 497–540.
- Hosang, W.; Bischof, W. (1998): Abwassertechnik, B.G. Teubner Stuttgart Leipzig, ISBN 3-519-15247-9
- Hulsbosch, K.; Falkenroth, U. (2008): Klärendes Verfahren an Ort und Stelle - Sauerstoffsysteme für industrielle Kläranlagen. In: P&A-Kompodium 2007/2008.
- Müller, N. (1986): Berechnungsgrundlagen und Anwendungsbeispiele zum Sauerstoffeintrag in Wasser und Abwasser über porenfreie Membranen. Herausgegeben von I. Sekoulov und P. Wilderer – Hamburg, Eigenverlag 1986, ISSN 0724/0783.
- Müller, B. (1999): Biologische Aufbereitung von Industrie-Abwässern mit Sauerstoff – Für hohe organische Belastungen. In: Fachartikelarchiv der Ernährungsindustrie, Ausgabe 04/1999.
- Müller, J.; Tiehm, A.; Böcker, K.; Eder, B.; Kopp, J.; Kunz, P. M.; Neis, U.; Oles, J.; Otte-Witte, R.; Schmelz, K.-G.; Seiler, K. (2003): Thermische, chemische und biochemische Desintegrationsverfahren. In: Korrespondenz Abwasser, Ausgabe 6/2003.
- Posch, A. (1999): Die Konzeption kommunaler Abwasserbehandlungssysteme aus ökonomischer Sicht. Dissertation, Institut für Innovations- und Umweltmanagement, Karl-Franzens-Universität Graz, 1999.
- Rudolph, K.-U. (1999): Kostenoptimierung der Abwasserentsorgung durch technische und organisatorische Maßnahmen, PROAQUA-Schriften (Hrsg.: L. Kuhnert, W. V. Schroedter), Bd. 1, Kosten und Gebühren der Abwasserentsorgung, Beiträge der 1. Wittenberger Abwassertagung, 18. und 19. November 1999, Lutherstadt Wittenberg, PROAQUA e. V.

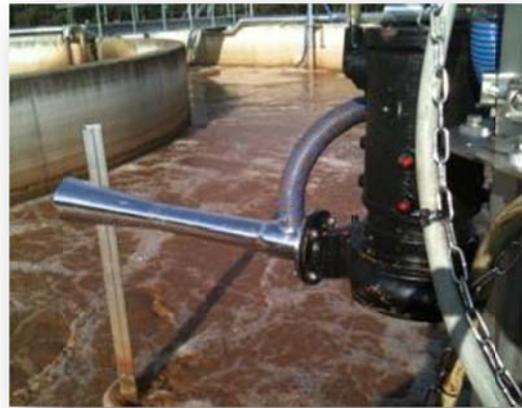
-
- Rudolph, K.-U.; Bombeck, M.; Fuhrmann, T.; Harbach, M. (2010): Stufenausbaukonzepte für kommunale Kläranlagen unter verschiedenen landesspezifischen Randbedingungen, Leitfaden zur Abwassertechnologie in anderen Ländern, Exportorientierte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Wasserver- und -entsorgung, Teil II: Abwasserbehandlung und Wasserwiederverwendung, Band 2 (Hrsg.: Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik), August 2010, Kapitel 4.4, S. 224 - 241.
ISBN 3-9810255-5-5, ISBN 978-3-9810255-5-2
- Schmid, A. (2006): Feinblasige Belüftung durch Sauerstoffeinspeisung unter „Superkavitation“. In: Korrespondenz Abwasser, Ausgabe 11/2006.
- Schmitt, T. G.; Hansen, J.; Richter, M. M.; Stahl, A. (2003): Zentrales Erfassungssystem zur Beratung bei Bläh- und Schwimmschlammproblemen auf kommunalen Kläranlagen. Schlussbericht – tectraa / Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft + Arbeitsgruppe künstliche Intelligenz – Wissensbasierte Systeme, Technische Universität Kaiserslautern, Dezember 2003.
- Schröder, M. (2002): Produktionsunternehmen Kläranlage, Baustein der zukünftigen Infrastruktur zur Energie- und Wasserversorgung. In: Korrespondenz Abwasser, Ausgabe 10/2002.
- Siekmann, K. (1986): Leistungsfähigkeit des zweistufigen Schlammstabilisierungsverfahrens nach dem System Sauerstoffbegasung mit anschließender Faulung im Vergleich zu einstufigen Faulung. Herausgeber: Professor Dr.-Ing. B. Böhnke, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der Rhein.-Westf. Techn. Hochschule Aachen, Vertrieb: Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V., Aachen 1986, ISSN 0342-6068.
- Smarsly, B. (1995): Zeolithe. Seminar für Experimentalvorträge im Rahmen des Chemielehramtsstudium an der Universität Marburg, Dezember 1995. URL: http://www.chids.de/veranstaltungen/uebungen_experimentalvortrag.html [17.09.2011]
- Sommer, E. und Reuner, W. (2003): Verbesserung der Prozessführung brennstoffbeheizter Wärmeöfen durch Verwendung sauerstoffpermeabler keramischer Schichten, Vortrag für den Ausschuss für metallurgische Grundlagen, Unterausschuss für physikalische Chemie, Unterausschuss für metallurgische Verfahrensentwicklung, Sitzung am 17.Dezember 2003.
- Stark, O. (2004): Überschussschlammreduktion auf der Kläranlage Bad König mit dem WWE-bionorm®-Verfahren. In: Korrespondenz Abwasser, Ausgabe 12/2004.
- Urban, U.; Heilmann, A.; Freystein, J. (2004): Ergebnisse der linearen und feinblasigen Belüftung einer Druckleitung zur Vermeidung von Geruchsemissionen und Korrosion. In: Korrespondenz Abwasser, Ausgabe 4/2004.

Anhang 1: Grundriss Belebungsbecken II mit VSA-Anlage (Quelle: AirProducts)



Anhang 2

Rührwerkbelüfter PODB-I (links) und Airjet AJ-150-1 (rechts)



Halia® Venturi Aeration System for LOX installations



Halia Propeller System as used for 3 of 4 dissolution devices during the trial (image shows stainless steel version)
