

Sektorenkopplung im Rahmen der Energiewende – Einsatz von Elektrolysesauerstoff auf kommunalen Kläranlagen

Sebastian Büttner¹, Mark Jentsch¹, Stefanie Hörlein¹, Bernd Hubner²

¹ Urban Energy Systems, Fakultät Bauingenieurwesen, Bauhaus-Universität Weimar
Coudraystraße 7, 99423 Weimar

² Wasserwerke im Landkreis Sonneberg, PIKO-Platz 1, 96515 Sonneberg

Kurzzusammenfassung

Der Umbau der Energiewirtschaft hin zu regenerativen Energiequellen erfordert eine Auseinandersetzung mit der technischen Anpassungsfähigkeit der derzeitigen Infrastruktursysteme und der dazugehörigen Organisations- bzw. Betreibermodelle. So stellt sich die Frage, inwieweit bestehende Infrastruktursysteme neue Aufgaben in einem zukünftigen Energieversorgungssystem übernehmen können bzw. dafür ausgerüstet werden müssen. Als eines dieser Infrastruktursysteme ist die Abwasserentsorgung zu sehen, die jedoch bislang kein Bestandteil einer sektorengekoppelten Betrachtung ist. Die Power to Gas – Technologie, bei der Wasser unter Einsatz von Elektrizität in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt wird, bietet dafür einen Ansatz.

Die vorliegende Arbeit präsentiert die Ergebnisse aus Untersuchungen zur Nutzung des in der Regel nicht verwerteten Sauerstoffs aus der Wasserelektrolyse im Rahmen der biologischen Reinigungsstufe kommunaler Kläranlagen. Der Sauerstoff ersetzt dabei die üblicherweise zur Versorgung der Mikroorganismen in das Abwasser eingebrachte Luft. In einer Versuchskläranlage im technischen Maßstab wurde hierbei über einen Zeitraum von 6 Monaten parallel der Betrieb mit Sauerstoff aus der Elektrolyse sowie der herkömmliche Betrieb mit Luft betrachtet.

Im Reinsauerstoffbetrieb konnten Verbesserungen des Stoffüberganges von Sauerstoff in Wasser ermittelt werden, so dass geringere Mengen an Sauerstoff eingebracht werden mussten als dies bei der Einbringung mit Luft notwendig war. Zudem stellten sich in den Versuchen auch die Abbauleistungen für Gesamtstickstoff und chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) im Vergleich zur herkömmlichen Betriebsweise mit Luft um bis zu 20 Prozentpunkte verbessert dar. Dadurch können höhere Abwasserbelastungen behandelt oder perspektivisch kleinere Baugrößen der Behandlungsanlagen realisiert werden. Mit dieser Arbeit wird nachgewiesen, dass kommunale Kläranlagen grundsätzlich als Standorte für die Wasserelektrolyse in Betracht gezogen werden können, da durch die Sauerstoffabnahme eine zusätzliche Einnahmequelle entsteht.

Schlagworte: Elektrolyse, Power to Gas, Sauerstoff, Kläranlage, Sektorenkopplung

1. Einleitung

Die Abwasserentsorgung spannt ein flächendeckendes Netz über das gesamte Gebiet der Bundesrepublik Deutschland. Dabei stehen Verteilung und Baugrößen der ca. 9300 kommunalen Kläranlagen [DWA, 2016] in unmittelbarem Zusammenhang zur Einwohnerzahl, d.h. an Orten mit vielen Einwohnern und damit auch hohem Energie- und Mobilitätsbedarf befinden sich entsprechend große und zumeist mehrere kommunale Kläranlagen. Diese haben einen hohen Energiebedarf [UBA, 2009], können aber auf der anderen Seite auch durch ihre zentrale Lage und ihre in der Regel hohe elektrische Anschlussleistung ein wesentliches Element einer erfolgreichen Sektorenkopplung im Rahmen der Energiewende darstellen.

Abbildung 1 zeigt den durchschnittlichen Energiebedarf kommunaler Kläranlagen nach den einzelnen Bereichen der Abwasserbehandlung [UBA, 2009]. Den größten Anteil macht dabei die biologische Reinigungsstufe mit durchschnittlich 67 %-Punkten aus, die sich wiederum zu 12 %-Punkten auf die Nachklärung, Rührwerke und kleinere Aggregate und zu 55 %-Punkten auf die Belebung, d.h. die Versorgung der Bakterien mit Sauerstoff aufteilen lässt. Versorgung mit Sauerstoff bedeutet in diesem Fall der Betrieb von Gebläsen, mit denen Umgebungsluft in das Abwasser eingebracht wird [Imhoff, 1999]. Der hohe Energiebedarf ist dabei vor allem dadurch verursacht, dass sehr große Luftmengen am Boden der sogenannten Belebungsbecken unter einem Druck von typischerweise ca. 0,4 bar (4 m Wassersäule) eingebracht werden müssen. Auf dem Weg an die Wasseroberfläche löst sich ein Teil des Luftsauerstoffs im Abwasser und wird von Bakterien bei der Reinigung des Abwassers verstoffwechselt. Die Umgebungsluft besteht jedoch lediglich zu ca. 21 % aus Sauerstoff. Den Rest bilden Stickstoff zu ca. 78 % und weitere Gase wie Argon und Kohlendioxid mit weniger als 1 %. D.h. ca. 79 % des Volumenstroms werden nahezu ungenutzt über die Gebläse in die Belebungsbecken eingebracht, wodurch an der stofflichen Nutzung gemessen ein energieeffizienter Gebläseeinsatz prinzipiell nicht realisierbar ist.

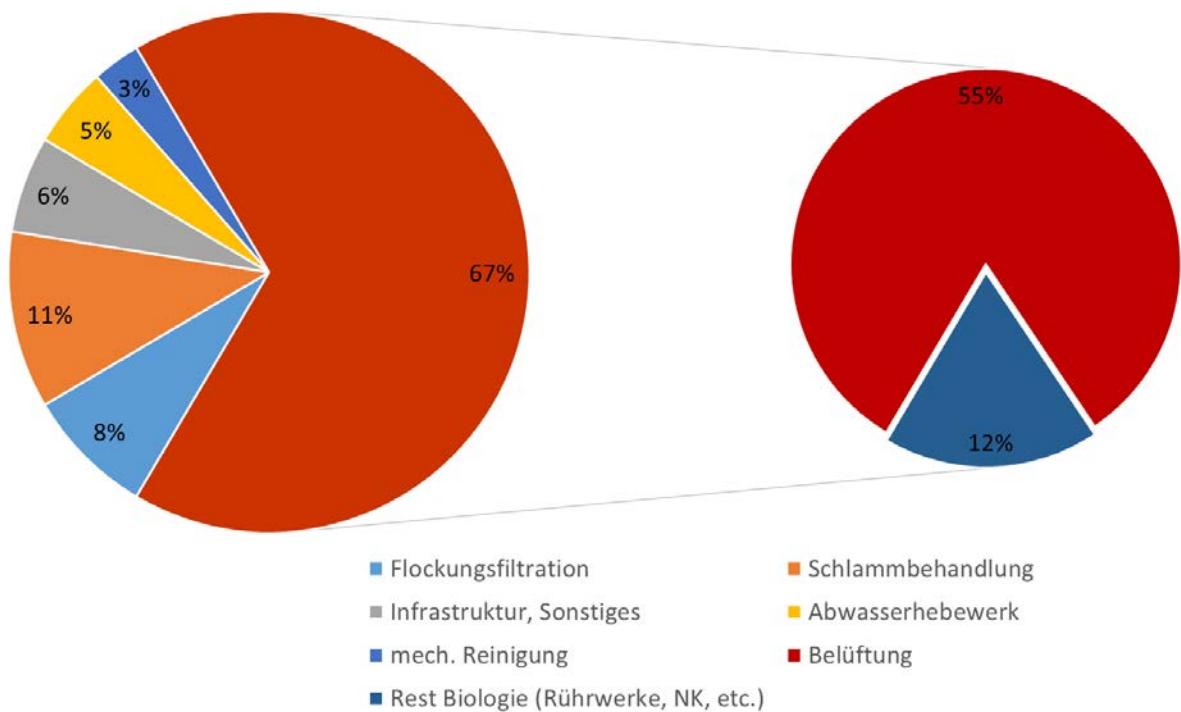


Abbildung 1 – Verteilung des Energiebedarfes kommunaler Kläranlagen, nach [UBA, 2009].

Ein Ansatz für den energieeffizienteren Betrieb der biologischen Reinigungsstufe kommunaler Kläranlagen ist die Versorgung der Belebung mit Reinsauerstoff. Bislang war dies nur in Ausnahmesituativen eine in Betracht zu ziehende Variante, da der Sauerstoff mit hohem Energieaufwand aus der Umgebungsluft abgetrennt werden musste. Das konnte nur gerechtfertigt werden, wenn kommunale Kläranlagen mit saisonalen Frachterhöhungen konfrontiert waren, wie z.B. in Regionen mit bestimmten landwirtschaftlichen Nutzungsprofilen (z.B. Weinbau) oder in touristisch geprägten Gebieten. Im Überlastungsfall wird bei solchen Anlagen nämlich Reinsauerstoff über die bestehenden Belüftungseinrichtungen in das Abwasser eingebracht, um die Reinigungsleistung temporär zu erhöhen, was mit hohen Kosten verbunden ist. Daneben gibt es Anlagen mit speziellen Verfahrensführungen wie z.B. einer vorgeschalteten Hochlast-Kohlenstoffelimination, die mit abgedeckten Becken und einer Eintragung der über der Wasserfläche stehenden Gasphase mittels Kreiselbelüftern betrieben werden, um den Reinsauerstoff möglichst effizient zu nutzen. Diese Anlagen werden mit einer zusätzlichen Reinsauerstoffversorgung betrieben und kommen in der Regel nur bei besonderen Abwässern wie z.B.

sehr kohlenstoffhaltigen Industrieabwässern zum Einsatz. Im vorliegenden Fall wird jedoch eine kommunale Kläranlage betrachtet, die nicht mit saisonalen Frachterhöhungen konfrontiert ist und auch nicht in einer besonderen Verfahrensführung wie der oben genannten Hochlast-Kohlenstoffelimination betrieben wird. Zudem soll der gesamte Sauerstoffbedarf der betrachteten kommunalen Kläranlage über Reinsauerstoff gedeckt und damit eine vollständige Substitution der konventionellen Belüftung über Gebläse avisiert werden. Ausgangspunkt dieses Ansatzes ist die Betrachtung von kommunalen Kläranlagen als Infrastruktur, die eine Sektorenkopplung im Rahmen der Energiewende ermöglicht. Aufgrund der gleichmäßigen Verteilung kommunaler Kläranlagen in der Fläche und ihrer in den höheren Größenklassen leistungsfähigen elektrotechnischen Ausstattung, insbesondere Transformatoren mit Anschluss auf der Mittelspannungsebene, empfehlen sie sich als dezentraler Standort für die Wasserelektrolyse. So bieten kommunale Kläranlagen mit On-Site-Wasserelektrolyse Möglichkeiten:

- a) zur Bereitstellung von negativer Regelenergie durch den Betrieb des Elektrolyseurs zur effektiven Nutzung von Spitzen im regionalen Dargebot von Elektrizität durch fluktuiierende erneuerbare Energieanlagen,
- b) zur dezentralen Wasserstoffbereitstellung für Mobilitätsanwendungen und
- c) zu einer effizienten, energetisch wie ökonomisch relevanten Nutzung des Wasserelektrolyseproduktes Reinsauerstoff am Ort der Entstehung.

Diese Arbeit beschreibt in Vorbereitung der Umsetzung von Wasserelektrolysesystemen auf Kläranlagen Versuchsergebnisse aus einer Versuchskläranlage zur biologischen Reinigung von kommunalem Abwasser mit Reinsauerstoff.

2. Versuchskläranlage – Aufbau und Betrieb

Die Versuchskläranlage befindet sich auf dem Standort der kommunalen Kläranlage Sonneberg-Heubisch der Wasserwerke im Landkreis Sonneberg und wurde 2016 im Rahmen des durch das BMBF geförderten Projektes LocalHy geplant und errichtet. Wie aus Abbildung 2 ersichtlich wird, ist die Versuchskläranlage, bestehend aus Belebungsbecken und den dazugehörigen Nachklärbecken, mit zwei parallelen Reinigungsstraßen aufgebaut, was einen vergleichenden Betrieb zwischen einer konventionellen Belüftung mit Umgebungsluft und der Reinsauerstoffeinbringung ermöglicht.



Abbildung 2 – Versuchskläranlage zur Reinsauerstoffnutzung aus der Wasserelektrolyse, (1 – Belebungsbecken 1; 2 – Belebungsbecken 2; 3 – Nachklärbecken 1; 4 – Nachklärbecken 2; 5 – Maschinenhaus mit Anlagen zur Luft- sowie Reinsauerstoffversorgung und EMSR-Technik).

Die Notwendigkeit der Zweistraßigkeit ergibt sich dadurch, dass Abwasser aus Mischkanalisationen wie im vorliegenden Fall durch das Nutzerverhalten und Niederschläge qualitativen und quantitativen Schwankungen unterworfen ist (siehe auch Zulaufkonzentrationen in Abbildung 5), so dass ein serieller Vergleich verschiedener Betriebsweisen nicht möglich ist. Ein direkter Vergleich zwischen konventionellem Betrieb mit Luft und dem Betrieb mit Reinsauerstoff ist daher unerlässlich, um die beiden Betriebsweisen sowohl stofflich als auch energetisch bewerten zu können.

Die nachfolgende Abbildung 3 zeigt das grundlegende RI-Schema der beiden Straßen, die identisch aufgebaut sind. Die Belebungsbecken ermöglichen einen maximalen Füllstand von 4,5 m, womit die gesamte Versuchskläranlage eine Behandlungskapazität erreicht, die dem Abwasser von ca. 275 Einwohnern entspricht. Zudem ist eine Reduzierung des maximalen Füllstandes bis auf 2,8 m möglich, wodurch der Einflussfaktor Wassertiefe in den Untersuchungen berücksichtigt werden kann. In beiden Belebungsbecken sind Belüftungseinrichtungen für die Luft- und Reinsauerstoffeinbringung installiert, wodurch in Ergänzung zur konventionellen Belüftung auch Untersuchungen zu einer zusätzlichen Reinsauerstoffversorgung möglich sind. Das in den Belebungsbecken behandelte Abwasser wird im freien Gefälle dem jeweiligen Nachklärbecken zugeführt und verlässt die Anlage nach erfolgter Reinigung wiederum im freien Gefälle. In den Belebungsbecken ist eine Umwälzpumpe installiert, die die Mikroorganismen in den unbelüfteten Phasen in der Schwebe hält. Aus den Nachklärbecken werden die abgetrennten Mikroorganismen über eine Pumpe in die Belebungsbecken zurückgeführt, um dem Reinigungsprozess nicht verloren zu gehen.

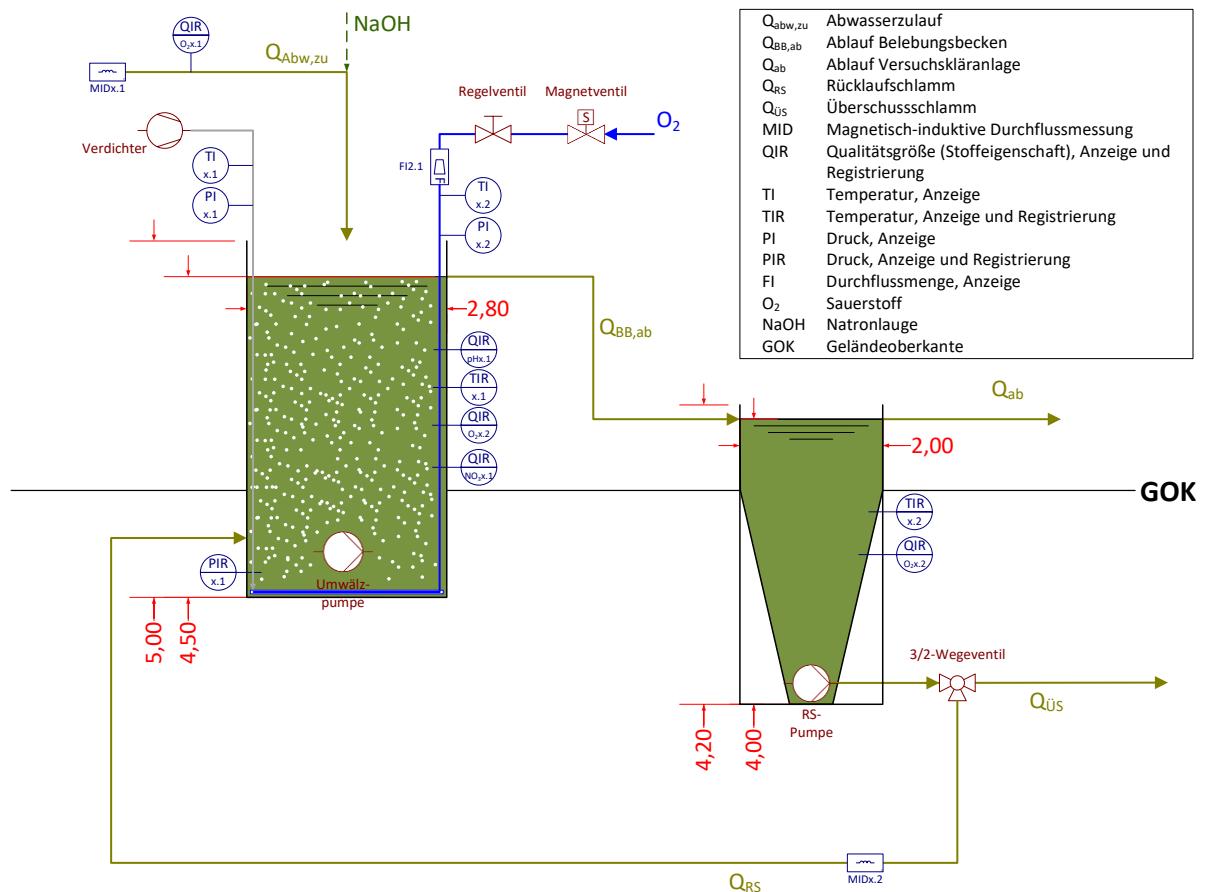


Abbildung 3 – grundsätzliches RI-Schema der beiden Straßen der Versuchskläranlage.

Literaturwerte belegen, dass bei der Reinsauerstoffbelüftung in der Regel eine geringere Gasmenge in das Abwasser eingebracht werden muss als im konventionellen Betrieb, wodurch unter Umständen die durch den Reinigungsprozess entstehenden Säurebildner nicht im erforderlichen Maße aus-

dem Belebungsbecken ausgestrippt werden können und der pH-Wert in einen für die Reinigungsprozesse ungünstigen Bereich fällt [Emsland, 2012]. Um dem entgegenzuwirken, ist es in der Versuchskläranlage optional möglich, Natronlauge in den Abwasserzulauf zu dosieren und damit die Pufferkapazität des Abwassers zu erhöhen.

Wie bereits angeführt und in Abbildung 4 zu sehen ist, sind in beiden Belebungsbecken parallel Belüftungssysteme für Luft und Reinsauerstoff installiert. Diese sind grundlegend unterschiedlich aufgebaut. Das konventionelle Belüftungssystem mit Luft muss der Anforderung genügen, einen möglichst hohen Sauerstoffeintrag in das Abwasser zu gewährleisten und dabei keinen zusätzlichen Druckverlust zu verursachen. Dadurch soll der Energiebedarf für die Gebläse zur Lufteinbringung so gering wie möglich gehalten werden. Entscheidend ist die über dem Belüfter stehende Wassersäule, die einen Druck von 0,45 bar verursacht, der zusätzlich zu den Rohrleitungsdruckverlusten überwunden werden muss. Dieses Belüftungssystem folgt daher einem Aufbau bestehend aus Luftverteilungssystem, Stützkörpern und dem eigentlichen Schlauchbelüfter. Das Belüftungssystem für Reinsauerstoff hingegen erfüllt lediglich die Anforderung der möglichst effizienten Einbringung des Sauerstoffs in das Abwasser, während der Druckverlust keine Rolle spielt. Dies liegt darin begründet, dass die Versorgung dieses Belüftungssystems mit Reinsauerstoff in der Regel über Druckgasflaschen (max. 300 bar) oder verflüssigten Sauerstoff (18 oder 36 bar) erfolgt. Der für die Reinsauerstofferzeugung vorgesehene Elektrolyseur stellt die Produktgase Wasserstoff und Sauerstoff bei einem Druck von 100 bar zur Verfügung. Der Belüfter für Reinsauerstoff arbeitet bei einem Betriebsdruck von ca. 2,5 bar. Zudem ist, wie aus Abbildung 4 ersichtlich wird, die Installation des Reinsauerstoffbelüfters sehr einfach auf dem bestehenden konventionellen Belüftungssystem realisierbar. Damit eignet sich dieses System besonders gut für eine Nachrüstung konventionell belüfteter Belebungsbecken.

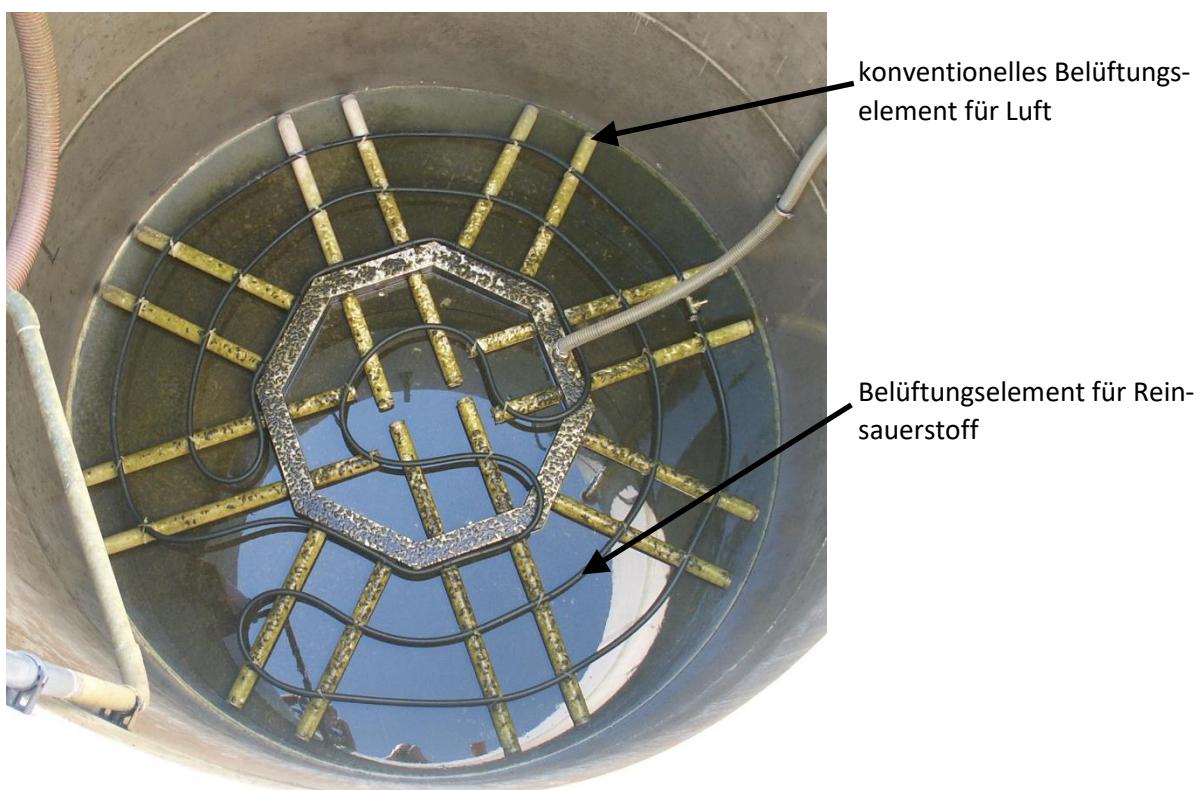


Abbildung 4 – parallel installierte Belüftungselemente für Luft und Reinsauerstoff in der Versuchskläranlage in Sonneberg-Heubisch.

Die Verwendung eines angepassten Belüftungssystems ist zwingend notwendig, da aufgrund des auf ein Fünftel reduzierten Volumenstromes bei der ausschließlichen Reinsauerstoffeinbringung die Regelbeaufschlagung von 2 bis 9 Nm³/h*m des konventionellen Belüfters nicht erreicht würde oder aber die fünffache Menge Reinsauerstoff eingebracht werden müsste, um den Betriebsbereich des Belüfters zu erreichen. Dies würde jedoch in einem ineffizienten Anlagenbetrieb resultieren.

Für die Betriebsführung sowie die Bewertung der Prozesse in der Versuchskläranlage werden, wie bereits in Abbildung 3 gezeigt wurde, nachfolgende Parameter messtechnisch erfasst:

- Zulaufmenge Abwasser
- Rücklaufschlammmenge
- Durchflussmenge des Reinsauerstoffs
- Sauerstoffkonzentrationen im Abwasserzulauf, Belebungsbecken sowie Nachklärbecken
- Temperaturen der Stoffströme Gebläseluft und Reinsauerstoff sowie die Prozesstemperaturen im Belebungs- und Nachklärbecken
- Betriebsdrücke der Stoffströme Gebläseluft und Reinsauerstoff
- pH-Wert und Nitratkonzentration im Belebungsbecken
- Füllstand des Belebungsbeckens

Darüber hinaus werden regelmäßige Beprobungen vorgenommen, um die relevanten Stoffkonzentrationen (Chemischer Sauerstoffbedarf, Gesamt-Stickstoff, Ammonium-Stickstoff) zur Bewertung der Reinigungsleistung der Versuchskläranlage im Labor zu ermitteln.

Zielstellung im Rahmen der Betriebsführung der Versuchskläranlage war die Realisierung einer Betriebsweise vergleichbar zu kommunalen Kläranlagen der Größenklassen GK 3 bis 5 (Ausbaugröße >5.000 Einwohnerwerte), für die neben den Anforderungswerten für organische Verschmutzungen (Chemischer Sauerstoffbedarf, Biologischer Sauerstoffbedarf) zusätzlich auch Anforderungswerte für Ammonium-Stickstoff (ab GK3) und den Gesamt-Stickstoff (ab GK4 und 5) vorgegeben sind [AbwV, 2004]. Dies impliziert neben dem Kohlenstoffabbau die Stickstoffreduzierung über Nitrifikation und Denitrifikation, was eine Betriebsführung auf Grundlage eines weitgehenden EMSR-Konzeptes erforderlich macht. Für eine solche Betriebsweise ist die Strukturierung in zwei grundsätzliche Phasen notwendig:

- a) eine belüftete Phase, in der unter aeroben Bedingungen der Kohlenstoffabbau sowie die Nitrifikation stattfinden und
- b) eine unbelüftete Phase, in der unter Abwesenheit von Sauerstoff (anoxische Bedingungen) die Denitrifikation zur Umwandlung des bei der Nitrifikation entstandenen Nitrates in molekularen Stickstoff vollzogen wird.

Diese beiden Phasen werden in der Versuchskläranlage in stetiger Abfolge betriebstechnisch umgesetzt. Der Wechsel wird dabei durch einen Zielkorridor der Nitratkonzentration in den jeweiligen Belebungsbecken festgelegt. Bei Erreichen des oberen Grenzwertes dieses Korridors erfolgt der Wechsel in die unbelüftete Phase. Wird der untere Grenzwert erreicht, beginnt wiederum die belüftete Phase. Um der Geschwindigkeit der biologischen Stoffumsatzprozesse gerecht zu werden, unterliegt die Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken wiederum einem Zielbereich, der in der belüfteten Phase die Zuführung von Luft oder Reinsauerstoff bei Erreichen des oberen Grenzwertes unterbricht und bei Erreichen des unteren Grenzwertes wieder freigibt. Zudem werden in einem definierten Zeitintervall die im Nachklärbecken abgetrennten Mikroorganismen in das jeweilige Belebungsbecken zurückgeführt. Um den Prozess in einem für den Stoffumsatz günstigen pH-Wert Bereich zu betreiben, kann weiterhin dem Abwasserzulauf bei Bedarf Natronlauge zudosiert und somit die Pufferkapazität im Belebungsbecken erhöht werden.

3. Ergebnisse aus dem vergleichenden Betrieb der Versuchskläranlage aus 2017

Das Versuchsjahr 2017 stand unter der Zielstellung, die grundsätzliche Betreibbarkeit der Versuchskläranlage mit Reinsauerstoff unter dem oben genannten Regelungsregime zu realisieren und damit die Substituierbarkeit der Gebläse durch Reinsauerstoff zu untersuchen. Im Jahr 2017 konnte der Betrieb der Versuchskläranlage über einen Zeitraum von insgesamt ca. 8 Monaten gewährleistet werden. Hierbei wurden die in der Tabelle 1 gezeigten Versuchspunkte (VP0 bis VP5) gefahren.

Tabelle 1 – 2017 in der Versuchskläranlage gefahrene Versuche.

Versuchs- punkt	Zeitraum	Betriebs- weise	Betriebs- weise	Randbedingungen
		BB1	BB2	
VP0	April 2017	Luft	Luft	- Einfahrbetrieb beider Straßen in konventioneller Fahrweise bei maximalem Füllstand (4,5 m)
VP1	Mai/Juni 2017	Reinsauerstoff	Reinsauerstoff	- Füllstand im Belebungsbecken 1 in Abbildung 2 (BB1) von 2,8 m (minimal möglicher Füllstand) und im Belebungsbecken 2 in Abbildung 2 (BB2) von 4,5 m (maximal möglicher Füllstand)
VP2	Juni/Juli 2017	Reinsauerstoff	Reinsauerstoff	- Füllstand im BB1 von 2,8 m und im BB2 von 4,5 m - O ₂ -Messung aus der Nachklärung als Sollwertmessung in die Belebungsbecken verschoben aufgrund der einfacheren Handhabbarkeit im Betrieb gegenüber dem ursprünglichen Messsystem
VP3	August 2017	Reinsauerstoff	Reinsauerstoff	- Füllstand in beiden Belebungsbecken 4,5 m (Maximum) - O ₂ -Messung aus der Nachklärung als Sollwertmessung genutzt aufgrund der einfacheren Handhabbarkeit im Betrieb - pH-Wert Anhebung in beiden Belebungsbecken durch Natronlauge
VP4	Septem- ber/Oktö- ber 2017	Reinsauerstoff	Reinsauerstoff	- Füllstand in beiden Belebungsbecken 4,5 m (Maximum) - O ₂ -Messung aus der Nachklärung als Sollwertmessung genutzt aufgrund der einfacheren Handhabbarkeit im Betrieb - pH-Wert Anhebung nur in BB2
VP5	Oktober – Dezember 2017	Luft	Reinsauerstoff	- Füllstand in beiden Belebungsbecken 4,5 m (Maximum) - O ₂ -Messung aus der Nachklärung als Sollwertmessung aufgrund der einfacheren Handhabbarkeit im Betrieb

Die nachfolgende Übersicht in Abbildung 5 zeigt, abgesehen von Versuchspunkt VP0, der nicht dargestellt wird, eine Gegenüberstellung der Messergebnisse der einzelnen Versuchspunkte aus den beiden Belebungsbecken. Dabei werden jeweils die Stoffkonzentrationen des Zulaufes, des Ablaufes von Belebungsbecken 1 und des Ablaufes von Belebungsbecken 2 für den Chemischen Sauerstoffbedarf, Gesamt-Stickstoff sowie Ammonium-Stickstoff dargestellt.

Aus den Messdaten für den Zulauf wird deutlich, dass das Abwasser, mit dem die Versuchskläranlage betrieben wird, als Mischwasser eine stark schwankende Charakteristik aufweist, was typisch für kommunale Abwässer ist [ATV-A-198, 2003]. So bewegt sich der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) in einem Konzentrationsbereich von 52 bis 485 mg/l, der Gesamtstickstoff (Gesamt N) zwischen 13,9 und 63,2 mg/l und der Ammonium-Stickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$) zwischen 4,0 und 37,5 mg/l. Allerdings zeigen die Ergebnisse in Abbildung 5 auch die grundsätzlich gute Funktion der Versuchskläranlage, da unabhängig von der Zulaufkonzentration gleichbleibend niedrige Ablaufwerte erreicht werden. Diese bewegen sich für den chemischen Sauerstoffbedarf zwischen 10 und 30 mg/l, für den Gesamt-Stickstoff zwischen 3,2 und 15,9 mg/l sowie für den Ammonium-Stickstoff zwischen 0,01 und 5,27 mg/l. Dabei werden Anforderungen erfüllt, die gemäß Abwasserverordnung [AbwV, 2004] an wesentlich größere Abwasserbehandlungsanlagen gestellt werden. Mehr noch, die Anforderungen werden größtenteils deutlich unterschritten.

In Tabelle 2 werden die mittleren Abbauleistungen der Versuchskläranlage für die verschiedenen Versuchspunkte für die Parameter CSB, Gesamt-N, und $\text{NH}_4\text{-N}$ zusammenfassend dargestellt. Zum Vergleich ist außerdem die durchschnittliche Abbauleistung für den chemischen Sauerstoffbedarf und den Gesamt-Stickstoff der kommunalen Kläranlagen der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. [DWA 2016] hinzugefügt. Zudem wird für die einzelnen Versuchspunkte sowie Straßen der Versuchskläranlage der Sauerstoffverbrauch mit aufgeführt.

Tabelle 2 – Abbauleistung der Versuchskläranlage in den verschiedenen im Jahr 2017 gefahrenen Versuchspunkten mit Vergleich zu den erreichten Durchschnittswerten der kommunalen Kläranlagen der DWA [DWA, 2016].

Versuchs-punkt und Zeitraum	VP1		VP2		VP3		VP4		VP5		DWA 2016
Straße	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
CSB	96%	95%	93%	93%	95%	96%	92%	93%	88%	88%	95 %
Gesamt-N	83%	82%	76%	73%	80%	83%	83%	83%	43%	63%	83 %
$\text{NH}_4\text{-N}$	96%	96%	89%	97%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	
O ₂ -Ver- brauch [kg/h]	0,64	0,48	0,76	0,67	0,25	0,52	0,19	0,43	0,42*	0,16	

* über das Gebläse eingebrachte O₂-Menge

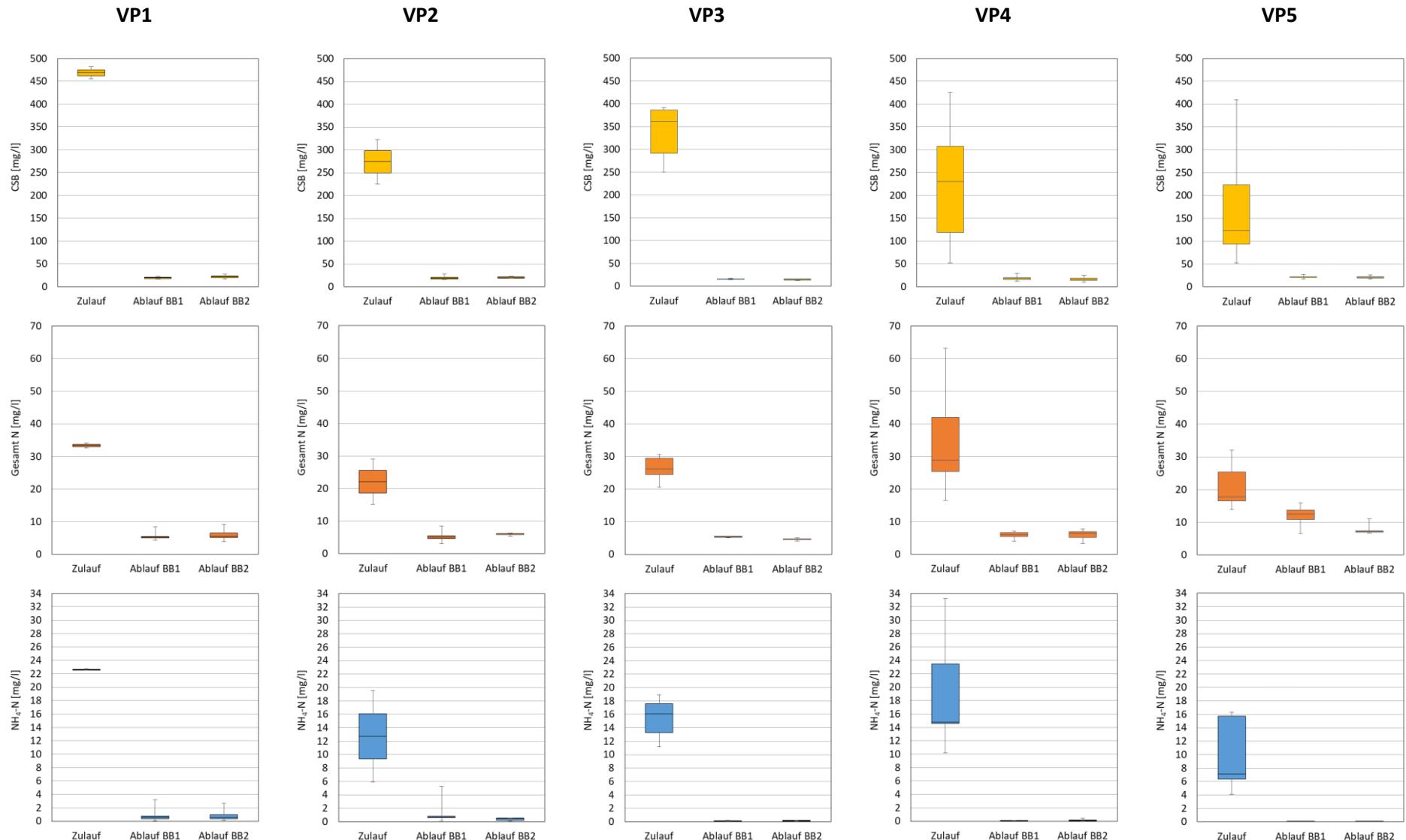


Abbildung 5 – Vergleich der Konzentrationen für CSB, Gesamt-N, und $\text{NH}_4\text{-N}$ im Zulauf und den Abläufen der Versuchskläranlage für die Versuche im Jahr 2017.

Aus den Daten zu den Versuchspunkten VP1 und VP2 wird ersichtlich, dass ein höherer Füllstand im Belebungsbecken, in diesem Fall in Straße 2 der Versuchskläranlage, mit einem geringeren Sauerstoffverbrauch einhergeht, was aufgrund der größeren zu überwindenden Höhe mit der längeren Aufenthaltszeit der Sauerstoffblasen in der Wassersäule und damit einem besseren Stoffübergang vom Gas in die Flüssigkeit begründet werden kann. Die von Versuchspunkt VP1 zu VP2 zurückgehende Abbauleistung für Gesamtstickstoff erklärt sich aus einem dauerhaften Abfall des pH-Wertes im Verlauf des Versuchspunktes VP1 unter einen Wert von 6,4, wodurch eine Schädigung des Belebtschlammes hervorgerufen wird und es zu einem Verlust an Biomasse kommt, die für die Abbauprozesse entscheidend ist [DWA-A-131, 2016]. Dieser Vorgang konnte in den Versuchspunkten VP1 und VP2 in Form von Schwimmschlamm beobachtet werden.

In den Versuchspunkten VP3 und VP4 wurde daher der Einfluss einer pH-Wert-Anhebung auf die Abbauleistung untersucht. Dafür wurde dem Abwasserzulauf Natronlauge zudosiert, um für die Biomasse und damit auch die Stickstoffelimination günstige pH-Werte größer 7 zu erreichen. Aus Tabelle 2 sowie Abbildung 5 wird deutlich, dass sich der Abbau von Ammonium-Stickstoff und in der Folge auch des Gesamt-Stickstoffs dadurch erwartungsgemäß weiter verbessert hat. Somit konnte die Abbauleistung von Versuchspunkt VP2 zu VP3 in Belebungsbecken 1 von 76 % auf 80 % und in Belebungsbecken 2 von 73 % auf 83 % gesteigert werden. Die beobachteten Schwimmschlammprobleme konnten damit ebenfalls behoben werden.

Der vergleichende Betrieb in VP5 war bereits durch den eintretenden Winter gekennzeichnet. Die um 4 bis 8 %-Punkte gegenüber den vorherigen Versuchspunkten leicht zurückgegangene Abbauleistung bezüglich der Kohlenstoffverbindungen (CSB) sowie der stark ausgeprägte Rückgang um 40 %-Punkte für den Gesamt-Stickstoff in BB1 bei Unterschreitung einer Abwassertemperatur von 13°C beziehungsweise 20 %-Punkte in BB2 gegenüber VP4, spiegeln die Temperaturabhängigkeit der biologischen Prozesse im Kläranlagenbetrieb wieder. So gelten gemäß [AbwV, 2004] die Anforderungen für Ammoniumstickstoff und Gesamt-Stickstoff für die Einleitung in das Gewässer nur bis zu einer minimalen Abwassertemperatur im Ablauf des biologischen Reaktors von 12 °C, da bei niedrigeren Temperaturen eine stabile Nitrifikation nicht mehr gegeben ist [DWA-A-131, 2016]. Dabei ist allerdings festzuhalten, dass in dem mit Reinsauerstoff betriebenen Belebungsbecken 2 der Versuchskläranlage erst bei einem weiteren Rückgang der Abwassertemperatur um 4 K auf 9°C ein Anstieg der Gesamt-Stickstoff-Konzentration zu verzeichnen war, die zu einem Rückgang der Abbauleistung von Versuchspunkt VP4 zu VP5 von 83 % auf 63 % geführt hat.

In dem in Abbildung 6 gezeigten Diagramm wird die stoffliche und energetische Effizienz der konventionellen Belüftung und der Reinsauerstoff-Belüftung im Versuchspunkt VP5 gegenübergestellt. Daraus geht zum einen hervor, dass der Sauerstoffverbrauch bei der Reinsauerstoff-Belüftung deutlich niedriger ausfällt, zum anderen zeigt sich, dass der Energiebedarf der konventionellen Versorgung mit Sauerstoff über Gebläse gegenüber der Versorgung mit Reinsauerstoff aus der Elektrolyse niedriger ist. Der grundsätzlich abfallende Energiebedarf aber auch Sauerstoffverbrauch über den Verlauf von Versuchspunkt VP5 begründet sich durch die niederschlagsbedingt geringer werdenden Konzentrationen des chemischen Sauerstoffbedarfes sowie Gesamt- und Ammonium-Stickstoffs im Versuchszeitraum. Dadurch ergibt sich zu Beginn des Versuchspunktes VP5 ein Sauerstoffverbrauch von maximal 23 kg/d für die konventionelle Gebläsesauerstoffversorgung und maximal 9,2 kg/d für die Versorgung mit Reinsauerstoff. Zum Ende des Versuchszeitraumes reduziert sich der Sauerstoffverbrauch für die konventionelle Sauerstoffversorgung über Gebläse auf 5,6 kg/d und maximal 2,0 kg/d für die Versorgung mit Reinsauerstoff. Demnach ist beim Einsatz von Reinsauerstoff eine höhere stoffliche Effizienz gegeben als beim konventionellen Betrieb mit Gebläsen.

Um die energetische Effizienz der beiden Systeme Gebläse und Elektrolyseur vergleichen zu können, muss die für die Belüftung notwendige Energie auf eine einheitliche Vergleichsebene bezogen werden. Für den Vorgang der Belüftung ist energetisch die Einbringung des Sauerstoffs in das Abwasser von Bedeutung, was durch die Erzeugung des Druckes zur Überwindung der Wassersäule sowie des Druckverlustes des Belüfters und der Rohrleitung quantifizierbar ist. Für das Gebläse zur Einbringung des Sauerstoffs wird somit lediglich die Verdichtungsarbeit als Vergleichsgröße angesetzt. Energie, die im Rahmen von Reibungsvorgängen in Wärme umgewandelt wird, bleibt unberücksichtigt. Analog wird mit dem Elektrolyseur verfahren, auch hier wird nur die Verdichtungsarbeit zur Bereitstellung des Sauerstoffs berücksichtigt. Die im Wasserstoff gespeicherte Energie, Prozesswärme und für periphere Prozesse wie z.B. die Wasseraufbereitung erforderliche Energie bleibt außen vor. Dabei ist hervorzuheben, dass der betrachtete Druckelektrolyseur den Wasserstoff mit einem Druck von 100 bar bereitstellt und somit eine wesentlich höhere Verdichtungsarbeit leistet als das Gebläse, welches lediglich einen Druck von 0,52 bar gewährleisten muss, um die Wassersäule von 4,5 m zu überwinden und die sonstigen Druckverluste auszugleichen. Dadurch ergibt sich zu Beginn des Versuchspunktes VP5 ein Energiebedarf für die Sauerstoffversorgung über Gebläse von maximal 0,68 kWh/d und für die Reinsauerstoffversorgung über die Wasserelektrolyse von maximal 1,26 kWh/d. Zum Ende des Versuchspunktes VP5 ergibt sich ein maximaler Energiebedarf von 0,17 kWh/d für die Gebläsesauerstoffversorgung und maximal 0,28 kWh/d für die Elektrolysesauerstoffversorgung. Somit stellt sich beim Vergleich der energetischen Effizienz das Gebläse zur Belüftung des Abwassers als günstiger dar.

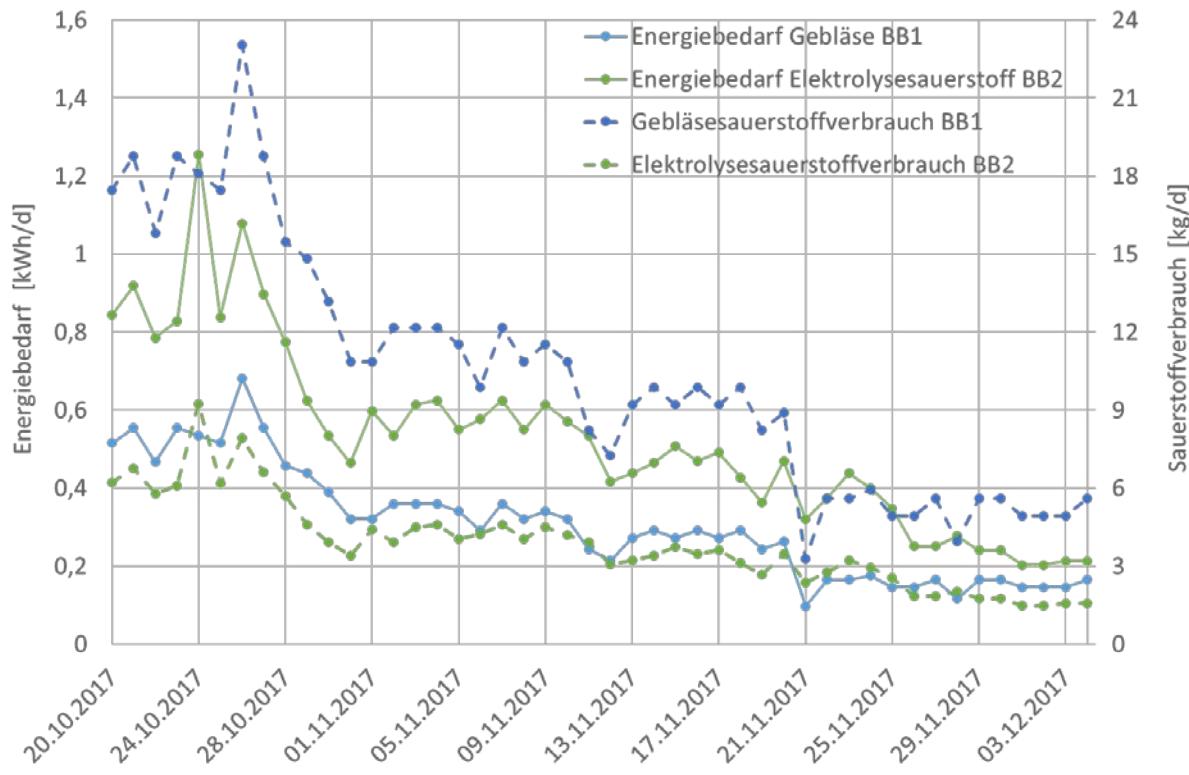


Abbildung 6 – Täglicher Energiebedarf sowie Sauerstoffverbrauch der beiden Belebungsbecken der Versuchskläranlage im vergleichenden Betrieb im VP5 (BB1 – Luft/Gebläse; BB2 – Reinsauerstoff)

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Versuche in der Versuchskläranlage haben gezeigt, dass die eingebrachte Reinsauerstoffmenge zur hydraulischen Umwälzung des Belebungsbeckens nicht ausreicht. Dies war bereits im Rahmen

der Inbetriebnahme im Vorfeld des Versuchsbetriebes im Jahr 2017 deutlich geworden und kam vor allem durch untypische Sauerstoffkonzentrationswerte zum Ausdruck. Während normalerweise im Belebungsbecken die Sauerstoffkonzentration durch die aeroben Abbauprozesse sinkt, wurden konstante Sauerstoffkonzentrationswerte gemessen. Aufgrund des schnellen Absinkens der Biomasse nach Unterbrechung der Belüftung erfolgte im Bereich der Messung der Sauerstoffkonzentration kein biologischer Abbau der Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen mehr, so dass der Sauerstoff erhalten blieb. Durch eine Verschiebung der Messung in den Bereich des abgesetzten Schlammes konnte dies nachgewiesen werden. Daher muss durch ein zusätzliches Aggregat die Durchmischung des Belebungsbeckens zum Ausgleich von Konzentrationsunterschieden gewährleistet werden, was in der Versuchskläranlage durch eine Tauchmotorpumpe erreicht wird. Geschieht dies nicht, setzt sich die Biomasse zu schnell ab und die Abbauprozesse vollziehen sich nicht im erforderlichen Maß, was zur Folge hat, dass eine Regelung der Kläranlage unter Einbeziehung der Sauerstoffkonzentration nicht realisiert werden kann.

Um eine hohe stoffliche Effizienz der Reinsauerstoffnutzung zu erreichen, sollte der Weg der Sauerstoffblasen durch die Wassersäule so lang wie möglich sein, d.h. ein höherer Anlagenfüllstand ist unbedingt zu bevorzugen. Dies wird in den Versuchspunkten VP1 und VP2 deutlich, in denen beim maximalen Anlagenfüllstand von 4,5 m ein um 25 bzw. 12 %-Punkte geringerer Sauerstoffverbrauch als beim minimalen Anlagenfüllstand von 2,8 m zu verzeichnen war. Aufgrund des mit hohem Druck verfügbaren Sauerstoffs aus der Wasserelektrolyse sind deutlich tiefere Belebungsbecken möglich als in der konventionellen, kommunalen Abwasserreinigung üblich sind, wodurch sich auch der energetische Vergleich zugunsten des Elektrolysesauerstoffs verbessern würde, da Gebläse dann eine entsprechend höhere Verdichtungsarbeit leisten müssten.

Es wurde nachgewiesen dass die Regelung des Reinsauerstoffbetriebes analog konventioneller Regelungsregime erfolgen kann. Im Fall der Versuchskläranlage wurde im Betrieb eine nitratgeführte, intermittierende Belüftung erfolgreich umgesetzt. Auf Grundlage der Sauerstoff- sowie Nitratkonzentration in den Belebungsbecken wurde der stetig wechselnde Betrieb zwischen belüfteter und unbeflütteter Phase abgebildet [DWA-A-131, 2016], was sich in den konstant hohen Abbauleistungen für Ammonium-Stickstoff von 99% in den Versuchspunkten VP3 bis VP5 und den konstant niedrigen Gesamt-Stickstoffkonzentrationen von 3,16 bis 9,16 mg/l in den Versuchspunkten VP1 bis VP4 wieder spiegelt.

Bezüglich der Effizienz der Belüftung muss zwischen einer stofflichen und einer energetischen Be trachtungsweise differenziert werden. Wie aus Abbildung 6 ersichtlich ist, kann im Rahmen der stofflichen Bewertung festgehalten werden, dass über den gesamten Versuchspunkt VP5 ein geringerer Reinsauerstoffverbrauch als Gebläsesauerstoffverbrauch erzielt werden konnte. Abbildung 6 zeigt aber auch, dass aus energetischer Sicht die Reinsauerstoffversorgung über die Wasserelektrolyse gegenüber der konventionellen Belüftung über Gebläse bei der gegebenen Wassertiefe von 4,5 m nicht bessergestellt ist.

In weiteren Untersuchungen soll ermittelt werden, inwiefern im Rahmen des optimierten Betriebes der Versuchskläranlage eine weitere Reduzierung des Reinsauerstoffverbrauches und damit auch eine energetische Verbesserung der Nutzung von Reinsauerstoff aus der Wasserelektrolyse möglich ist. Weiterhin sollen die Potentiale der Reinsauerstoffbelüftung für die Abwasserreinigung in Deutschland analysiert werden. Dazu ist es notwendig, die Leistungsgrenzen sowohl der konventionellen Gebläse- als auch der Reinsauerstoffbelüftung bezüglich der Behandlungskapazität in der Versuchskläranlage zu definieren, um die daraus resultierenden spezifischen Sauerstoff- und Energiebedarfe des Kläranlagenbetriebes auf die gesamte deutsche, kommunale Abwasserwirtschaft zu übertragen. Dies bildet die Grundlage für eine Bilanzierung des Gesamtsystems Wasserelektrolyse auf kommunalen Kläranlagen in einer sektorenübergreifenden Betrachtung. Konkret ist es dazu in einem

nächsten Schritt notwendig, Energie- und Stoffstrombilanzen auf Grundlage des Versuchsbetriebes zu erstellen und diese auf eine Gesamtbilanz der kommunalen Kläranlage Sonneberg-Heubisch zu übertragen. Damit ergibt sich dann die Möglichkeit, die Potentiale der Reinsauerstoffnutzung aus der Wasserelektrolyse im Zusammenhang mit der Energie- und Verkehrswende aufzuzeigen.

5. Danksagung

Das dieser Veröffentlichung zugrundeliegende Teilverfahren im Verbundvorhaben „LocalHy - Dezentrale Wasserelektrolyse mit kombinierter Wasserstoff und Sauerstoffnutzung aus erneuerbarer Energie“ wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der „Hydrogen Power Storage & Solutions East Germany (HYPOS)-Initiative“ unter dem Förderkennzeichen 03ZZ0705C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

6. Literaturverzeichnis

[AbwV, 2004] Abwasserverordnung (AbwV). Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer vom 17. Juni 2004, BGBl. I S. 1108, 2625. Stand: zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 22. August 2018 (BGBl. I S. 1327).

[ATV-A-198, 2003] ATV-DVWK (Hrsg.). ATV-DVWK-A 198 (April 2003): Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen. Arbeitsblatt. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (ATV-DVWK), 2003.

[DWA, 2016] DWA e.V. (Hrsg.). 29. Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), 2017.

[DWA-A-131, 2016] DWA e.V. (Hrsg.). DWA-A 131 (Juni 2016) Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Arbeitsblatt. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), 2016.

[Emsland, 2012] Rudolph, K.-U., Müller-Czygan, G. & Bombeck, M. Reinsauerstoffbelüftung auf kleinen Industriekläranlagen - Energieeinsparpotenziale und Kapazitätssteigerungen am Beispiel der Kläranlage der Fa. Emsland Frischgeflügel GmbH. Meschede: 2012.

[Imhoff, 1999] Imhoff, K. & Imhoff, K.R. Taschenbuch der Stadtentwässerung. 29. Auflage. München, Wien: Oldenbourg Verlag, 1999.

[UBA, 2009] Umweltbundesamt (Hrsg.). Energieeffizienz kommunaler Kläranlagen. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2009.