

BEURTEILUNG DER WIRTSCHAFTLICHKEIT VON BELÜFTUNGSSYSTEMEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER EINSATZDAUER

Wilhelm Frey, Leobendorf

1. Einleitung

Für den Betrieb einer biologischen Abwasserreinigungsanlage ist der Energieeinsatz für das Belüftungssystem ein wichtiger Parameter. Die für die Sauerstoffzufuhr erforderliche Energie wird wesentlich vom Druckverlust der Belüfterelemente und der Sauerstoffausnutzung im jeweiligen Betriebspunkt beeinflusst. Beide Größen werden durch Materialveränderungen aber auch Beläge und Verstopfungen des Belüfterkörpers verändert. Es wird das Blasengrößenspektrum, die Blasenablösung und die Frequenz der Blasenbildung beeinflusst.

Der vorliegende Beitrag versucht aufzuzeigen, wie die Veränderung der Gebrauchseigenschaften über der Einsatzdauer die Wirtschaftlichkeit des Belüftungssystems beeinflusst. Eine umfassende Betrachtung findet man in [1]. Es werden die beeinflussenden Parameter besprochen und eine Methode zur Abschätzung der Abminderung der Wirtschaftlichkeit vorgestellt. Anhand von Untersuchungen und Beispielen werden die in der Praxis auftretenden Veränderungen quantifiziert.

Der Vortrag beschränkt sich auf Druckbelüftungssysteme. Oberflächenbelüfter und sonstige Systeme werden nicht behandelt, da bei diesen Systemen Veränderungen der Belüftungseinrichtung praktisch nicht auftreten oder eine untergeordnete Rolle spielen.

2. Wirtschaftlichkeit von Belüftungssystemen

Unter dem Begriff Wirtschaftlichkeit wird im vorliegenden Beitrag nur der Energieverbrauch für das Einbringen des Sauerstoffes verstanden. Aufwendungen für die Wartung und Instandhaltung werden nicht behandelt. Details zu Fragen der Wartung von Belüftungssystemen findet man in z. B. in [2], [3], [4] und [5].

Um Veränderungen der Wirtschaftlichkeit zu erkennen ist es notwendig den Druckverlust der Belüfter zu ermitteln und die Veränderung der Sauerstoffausnutzung zu messen. Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit wird häufig der Sauerstoffertrag (SAE in kg/kWh) verwendet.

3. Messung des Druckverlustes von Belüfterelementen

Druckmessungen können direkt auf der Anlage, auch während des laufenden Betriebes, durchgeführt werden. Dies hat den Vorteil, dass man einen mittleren Druckverlust über die im jeweiligen Feld montierten Belüfter erhält. Die Messstelle für die Druckmessung sollte vorzugsweise nahe am Becken sein. Als günstig hat sich die Messung an einer Entwässerungsleitung erwiesen. Details zur Vorgangsweise bei Druckmessungen können der Literatur entnommen werden (z. B. [6]).

Messungen auf einem Druckprüfstand haben den Vorteil, dass der durchgesetzte Luftvolumenstrom exakt bestimmbar ist und auch die Wasserüberdeckung genau bekannt ist. Es können die Druckverluste des Belüfterkörpers (Drosseleinrichtung) und der Druckverlust der Belüftermembran gemeinsam oder auch getrennt erfasst werden. Nachteilig ist, dass nur einige wenige Belüfter (ein bis drei Stück) gleichzeitig gemessen werden können und somit eine Stichprobenprüfung stattfindet.

In der Regel kann bei Prüfstandsmessungen das Abgasungsverhalten gut beobachtet und dokumentiert werden (Foto- und Filmaufnahmen). Auch können mehrere Messungen an ungereinigten und mit verschiedenen Methoden gereinigten Belüftern ohne großen Aufwand durchgeführt werden.

In Abbildung 1 ist die Reinigung mit einer Dreckfräse zu sehen.

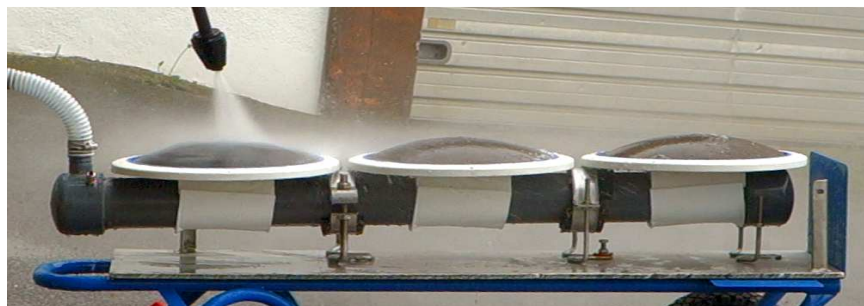
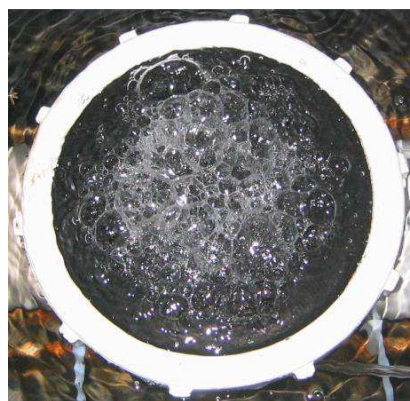


Abbildung 1: Reinigung mit Dreckfräse

Die Abbildung 2 zeigt das unterschiedliche Abgasungsverhalten gereinigter und ungereinigter Belüftermembranen.



UNGEREINIGT



GEREINIGT

Abbildung 2: Abgasungsverhalten ungereinigter und gereinigter Membranen

In den Datenblättern der Belüfterhersteller wird der Druckverlust der Belüfter in Abhängigkeit der Luftbeaufschlagung angegeben. Der Luftvolumenstrom wird dabei häufig auf den Normzustand oder eine Temperatur von 20°Celsius und 1013 hPa bezogen. Ohne Kenntnis des Versuchsaufbaus ist die Angabe des Druckverlustes unvollständig.

Bei Messungen in Belebungsbecken mit einigen Metern Einblastiefe ist der Luftvolumenstrom kleiner als auf einem Prüfstand mit einigen Zentimetern Wasserüberdeckung. Im Belebungsbecken werden daher in der Regel kleinere Druckverluste als auf Prüfständen bei gleichem Luftvolumenstrom im Normzustand (oder auch 20°C und 1013 hPa) gemessen.

Bei der Auswertung von Druckmessungen ist zu beachten, dass der sich einstellende Druckverlust von der tatsächlichen Strömungsgeschwindigkeit im Belüfter (dem Betriebsvolumenstrom) abhängig ist. Es ist notwendig die am Belüfter auftretenden Zustandsgrößen der Luft (Druck und Temperatur) zu messen oder abzuschätzen und den Luftvolumenstrom auf diese Zustandsgrößen umzurechnen.

In der folgenden Abbildung 3 ist das Ergebnis einer Druckmessung über dem Luftdurchsatz im Belüfterelement dargestellt.

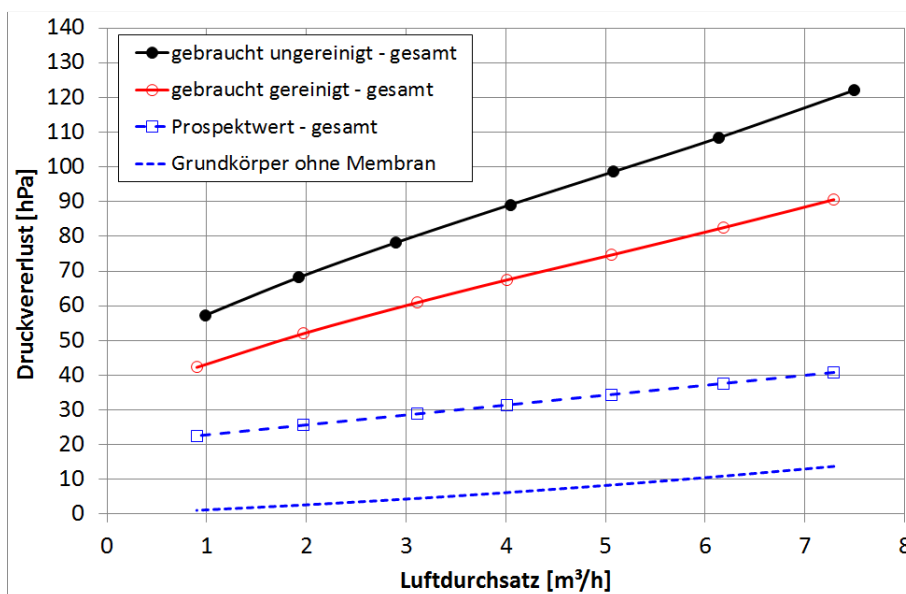


Abbildung 3: Druckverlust in Abhängigkeit der Luftbeaufschlagung

Gemessen wurden die Belüfter so wie sie aus dem Becken entnommen wurden (nur mit einem weichen Wasserstrahl abgewaschen). Anschließend wurden sie mit einem rotierenden Wasserstrahl (Dreckfräse) gereinigt und nochmal gemessen. Im Diagramm sind außerdem der Druckverlust aus dem Prospekt sowie der gemessene Druckverlust des Belüfterkörpers ohne Membran eingetragen.

Aus den Messwerten ist zu erkennen, dass durch die Reinigung eine Reduktion des Druckverlustes von 20 – 30 hPa erreicht werden konnte. Der Druckverlust der gereinigten Belüfter ist aber immer noch ca. doppelt so groß ist als der eines neuen Belüfters.

Die Antriebsenergie des Gebläses ist bei gleichem Luftvolumenstrom und Zustandsgrößen der angesaugten Luft in erster Näherung direkt proportional der Drucksteigerung.

Aus dem Diagramm kann man für eine Luftbeaufschlagung von 3 m³/Stk/h für einen neuer Belüfter einen Druckverlust von 28 hPa und für einen ungereinigten Belüfter 80 hPa ablesen. Den Energiemehrbedarf zufolge des gestiegenen Differenzdruckes errechnet man näherungsweise nach Gleichung 1.

$$\text{Energiemehrverbrauch [\%]} = \frac{\Delta p_{\text{Belüfter,gebraucht}} - \Delta p_{\text{Belüfter,neu}}}{\Delta p_{\text{Gebläse}} + \Delta p_{\text{Belüfter,neu}}} \cdot 100 \quad (\text{Glg.1})$$

Nimmt man für die Gebläsestufe eine Druckerhöhung von 450 hPa an erhält man den Energiemehrverbrauch zu:

$$\text{Energiemehrverbrauch [\%]} = \frac{80 \text{ hPa} - 28 \text{ hPa}}{450 \text{ hPa} + 28 \text{ hPa}} \cdot 100 = 10,9\%$$

Bei einer exakten Berechnung kann berücksichtigt werden, dass durch den höheren Systemdruck ein größerer Luftmassenstrom eingetragen wird. Geht man von einer konstanten Sauerstoffzufuhr aus, kann der Luftmassenstrom reduziert werden, wodurch auch der Luftvolumenstrom im Betriebszustand sinkt und damit auch der Druckverlust des Belüfters kleiner wird.

4. Sauerstoffzufuhrmessung

Die Messung der Sauerstoffzufuhr hat nach den geltenden Vorschriften EN 12255-15 [7] oder DWA M209 [8] zu erfolgen. Aussagekräftige Werte sind durch Reinwassermessungen mit neuen und gebrauchten Belüftern zu ermitteln. Details zu Durchführung von Sauerstoffzufuhrmessungen findet man u.a. in [9].

Messungen auf Großanlagen sind in der Regel aufwändig und kostenintensiv. Solche Messungen werden daher nur in Einzelfällen stattfinden. Es ist möglich Abschätzungen über die Veränderung der Sauerstoffzufuhrleistung von Belüfterelementen durch Messungen im technischen Maßstab (einige m³ Beckeninhalt) durchzuführen. Auch eine Bemusterung des Abgasungsverhaltens ist einfach realisierbar (Abbildung 4)

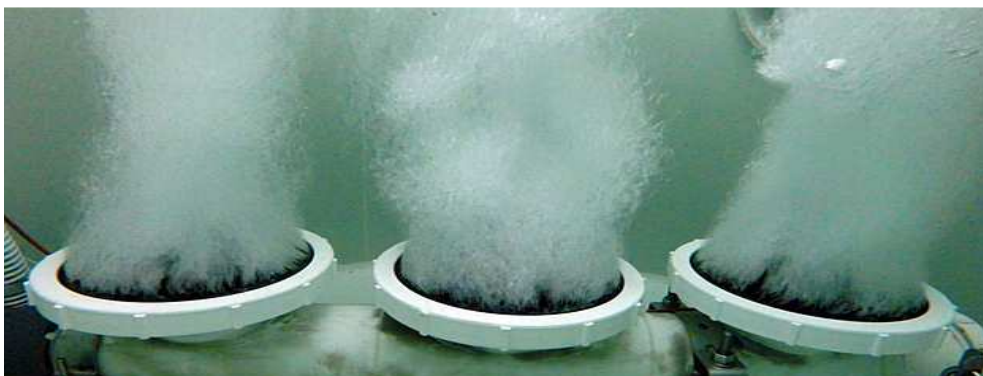


Abbildung 4: Abgasungsverhalten während einer Sauerstoffzufuhrmessung

Die Abbildung 5 zeigt eine Testanordnung zur Messung der Sauerstoffzufuhr. Der abgebildete Behälter hat eine Wassertiefe von 3,2 m und einen Durchmesser von 1,2 m. Im Teilbild rechts oben ist das Gebläse und der Drehkolbengaszähler mit Druck- und Temperaturmessung zu sehen.

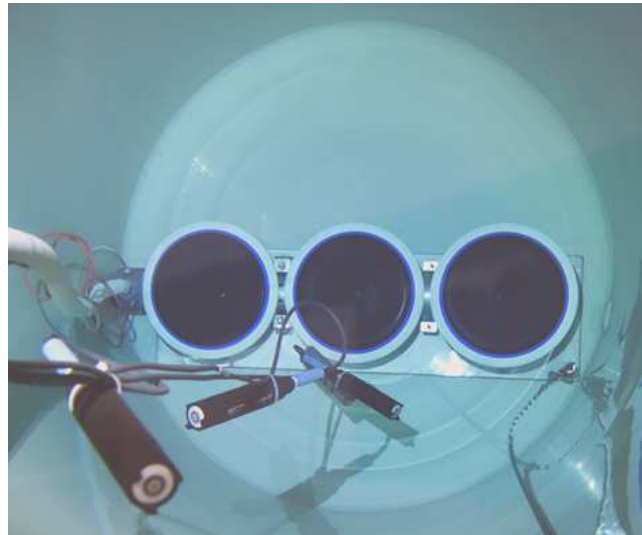


Abbildung 5: Prüfstand zur Ermittlung der Sauerstoffzufuhr

Auch bei Sauerstoffzufuhrmessungen ist es sinnvoll, sowohl den Luftvolumenstrom zu variieren, als auch neue Referenzbelüfter, ungereinigte und gereinigte Belüfterelemente einer Messung zu unterziehen. Als Ergebnis der Sauerstoffzufuhrmessung erhält man die Sauerstoffausnutzung ($\text{g}/\text{m}_\text{N}^3/\text{m}$).

In Abbildung 6 sind die Ergebnisse einer Messreihe dargestellt.

Bei einer Luftbeaufschlagung von $4 \text{ m}_\text{N}^3/\text{Stk}/\text{h}$ wurde mit neuen Belüftern eine Sauerstoffausnutzung (SSOTE) von ca. $21,3 \text{ g}/\text{m}_\text{N}^3/\text{m}$ und mit gebrauchten Belüftern eine SSOTE von ca. $19,6 \text{ g}/\text{m}_\text{N}^3/\text{m}$ ermittelt.

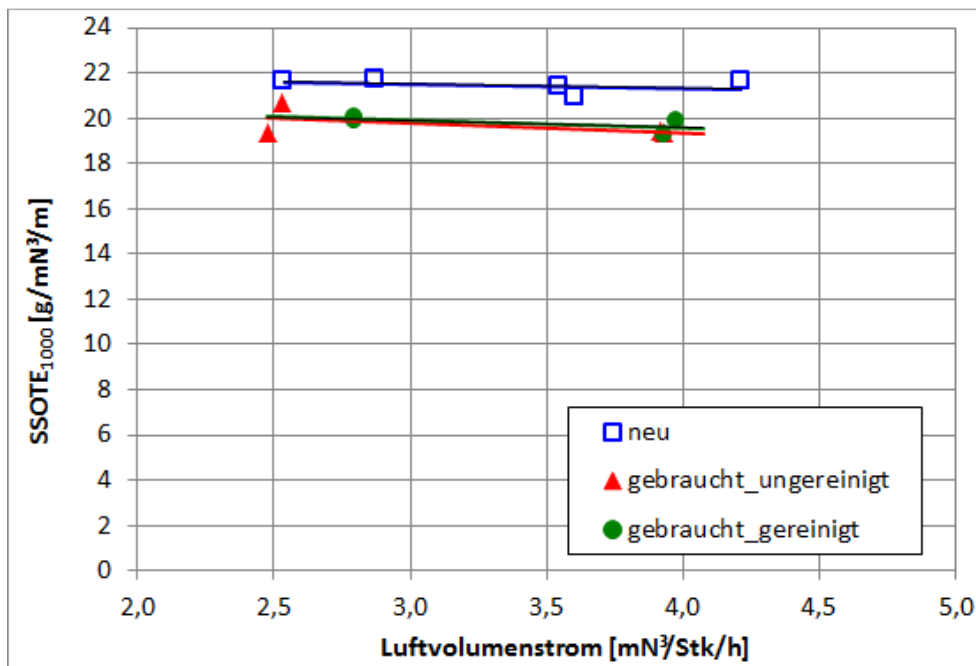


Abbildung 6: Ergebnisse von Sauerstoffzufuhrmessungen mit verschiedenen Membranen

Unter der Annahme, dass sich die gleiche Sauerstoffzufuhr erreicht werden soll, kann man mit Gleichung 2 näherungsweise den Energiemehrverbrauch berechnen.

$$\text{Energiemehrverbrauch [\%]} = \frac{\text{SSOTE}_{\text{neu}} - \text{SSOTE}_{\text{gebraucht}}}{\text{SSOTE}_{\text{gebraucht}}} \cdot 100 \quad (\text{Glg.2})$$

Mit den Zahlenwerten aus dem Beispiel erhält man:

$$\text{Energiemehrverbrauch [\%]} = \frac{21,3 - 19,6}{19,6} \cdot 100 = 8,7\%$$

Das bedeutet, dass für die gleiche Sauerstoffzufuhr ein um ca. 9 % größerer Luftvolumenstrom und damit um ca. 9% mehr Energie benötigt wird.

Bei einer exakten Berechnung kann auch hier berücksichtigt werden, dass durch den höheren Luftvolumenstrom ein größerer Systemdruck auftritt. Durch die gegenseitige Beeinflussung des Luftvolumenstromes und des Systemdrucks ist dann eine iterative Berechnung erforderlich.

5. Veränderung der Wirtschaftlichkeit – Gesamtbetrachtung

Durch steigenden Druckverlust der Belüfter steigt der Energieverbrauch und die Wirtschaftlichkeit sinkt. Die Sauerstoffausnutzung wird in der Regel während der Gebrauchsdauer geringer, daher muss für die gleiche Sauerstoffzufuhr mehr Luft eingeblasen werden und die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems reduziert sich.

Zur Abschätzung der Veränderung des Gesamtenergieverbrauches kann in erster Näherung durch Zusammenrechnen der beiden Erhöhungen aus dem Druckverlust der Veränderung der Sauerstoffausnutzung erfolgen.

Für eine exakte Ermittlung der Veränderung der Wirtschaftlichkeit ist für eine anzunehmende Sauerstoffzufuhr (z.B. Garantiewert) der erforderliche Luftmassenstrom zu ermitteln. Dieser Luftmassenstrom ist mit den tatsächlich auftretenden Zustandsgrößen der Luft (Gesamtdruck, Temperatur) in einen Luftvolumenstrom unter Betriebsbedingungen (nahe dem Belüfter) umzurechnen und daraus der Druckverlust der Belüfter zu ermitteln. Im Gesamtdruck ist auch der Druckverlust der Belüfter enthalten. Der Druckverlust der Belüfter ist vom Betriebsvolumenstrom und damit vom Gesamtdruck abhängig. Daher ist eine iterative Berechnung notwendig.

6. Beispiele durchgeführter Untersuchungen

Eine Fragebogenaktion zur Problematik „steigender Druckverlust bei Druckbelüftungssystemen“ im Rahmen der österreichischen Kläranlagennachbarschaften 2003 [10] hatte gezeigt, dass viele Anlagen in Österreich betroffen sind. Bei einer ähnliche Befragung in Baden-Württemberg 2005 [11] wurde auf vielen Anlagen ebenfalls ein steigender Druckverlust ermittelt.

6.1 Beispiele aus Deutschland

Im Rahmen eines Forschungsprojektes in Baden-Württemberg wurden auf einer Anlage mit 500.000 EW und einer Anlage mit 133.000 EW Sauerstoffzufuhrmessungen in Reinwasser durchgeführt. Untersucht wurden neue und gebrauchte Teller und Rohrbelüfter aus EPDM und Silikon. Die Messungen wurden nach ca. 1 Jahr und 2,5 Jahren Betrieb wiederholt [12]. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Zusammenstellung der Ergebnisse von Sauerstoffzufuhrmessungen nach [13]

	Anlage A (500.000EW)		Anlage B (133.000EW)	
	Tellerbelüfter	Tellerbelüfter	Rohrbelüfter	Rohrbelüfter
	EPDM	EPDM	EPDM	Silikon
		weichmacherred.		
Veränderung SSOTE nach 1 Jahr	-25%	-16%	-28%	11%
Veränderung SSOTE nach 2,5 Jahren	-	-16%	-	-

In der Studie wird ausdrücklich angegeben, dass keine zunehmenden Druckverluste beobachtet wurden. Als Ursache für die beobachteten Veränderungen der Sauerstoffausnutzung werden Veränderungen der Membranen vermutet.

6.2 Beispiele aus Österreich

Eigene Messungen auf einer Großanlage mit folgender Spezifikation:

- Becken: Umlaufbecken, 12.000 m³
- Einblastiefe 7,2 m
- Abwasser: ca. 50% Industrieabwasser
- Belüfter: Streifenbelüfter aus PU
- Luftbeaufschlagung (Auslegungswert): ca. 35 m³/m²/h

Es wurden Reinwassermessung im Neuzustand und nach ca. 7 Jahren Betriebszeit durchgeführt. Der Sauerstofftrag (SAE) im Neuzustand wird mit 100% beziffert. Die Messung mit den ungereinigten Belüftern ergab 74% des SAE im Neuzustand. Anschließend wurde das Becken entleert, die Belüfter mittels Hochdruckreiniger gereinigt und nochmals gemessen. Die Messung mit den gereinigten Belüftern ergab 97% des SAE im Neuzustand.

Nach einer Gebrauchsdauer von 15 Jahren wurden aus der selben Anlage einige Belüfter entnommen und in einem Testbehälter Reinwassermessungen durchgeführt. Die Messungen sind durch den Hersteller der Belüfter erfolgt. Der Testbehälter hatte eine Grundfläche von 4,5 m x 6,5 m und eine Einblastiefe von 7,2 m. Es wurden neue Belüfter und gebrauchte Belüfter unter identischen Randbedingungen untersucht. Die Messung mit den ungereinigten Belüftern ergab 94% des SAE im Neuzustand. Anschließend wurde das Becken entleert, die Belüfter mittels Hochdruckreiniger gereinigt und nochmals gemessen. Die Messung mit den gereinigten Belüftern ergab 101% des SAE im Neuzustand.

Prüfstandmessungen

Die Prüfstandmessungen haben in zwei verschiedenen Testbehältern stattgefunden. Geprüft wurden EPDM Tellerbelüfter verschiedener Hersteller. In der Tabelle 2 sind die Ergebnisse von einigen Messreihen der letzten Jahre zusammengefasst.

Tabelle 2: Zusammenfassung von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen an Tellerbelüftern aus EPDM

Nr.	Behälter	Gebrauchsdauer	Abwasser	Zustand	SAE (neu → 100%)	Bemerkung
1	2	2 Jahre	Kommunal	ungereinigt	107%	intermittierend
2	2	2 Jahre	Kommunal	ungereinigt	97%	Dauerbetrieb
3	1	7 Jahre	Kommunal	ungereinigt	79%	-
4	1	7 Jahre	Kommunal	gereinigt	81%	-
5	2	13 Jahre	Industrie	ungereinigt	81%	-
6	2	13 Jahre	Industrie	gereinigt	88%	-

Legende:

Testbehälter 1: Durchmesser 2,0 m, Wassertiefe 1,8 m

Testbehälter 2: Durchmesser 1,2 m, Wassertiefe 3,2 m

Der Sauerstoffertrag im Neuzustand wurde als Referenzwert mit 100% angesetzt

Man erkennt, dass die Wirtschaftlichkeit nach kurzer Gebrauchsdauer auch größer werden kann, mit längerer Gebrauchsdauer aber deutlich verringert wird. Die Beeinflussung der Wirtschaftlichkeit durch eine Reinigung der Belüfter ist in den untersuchten Fällen relativ gering. Daraus kann geschlossen werden, dass Materialveränderungen sich langfristig stärker auswirken als die Bildung verstopfender Ablagerungen.

7. Fazit

Durch Druck- und Sauerstoffzufuhrmessungen können Veränderungen von Belüfterelementen erkannt werden. Aus den Messergebnissen ist es möglich belastbare Aussagen zur Abnahme der Wirtschaftlichkeit des Belüftungssystems abzuleiten. Diese Ergebnisse bieten eine Hilfestellung bei der Entscheidung über Reinigungsmaßnahmen oder den Austausch von Belüfterelementen.

Wie die Beispiele zeigen, wird nicht immer eine Druckerhöhung im Betrieb festgestellt, die Abnahme der Sauerstoffausnutzung kann aber dennoch erheblich sein.

Erstaunlich sind die Ergebnisse der Untersuchungen an PU Membranen. Die Erhaltung der Leistungsfähigkeit über eine Gebrauchsdauer von mehr als 10 Jahren wurde bisher noch nicht dokumentiert. Weitere Untersuchungen an anderen Anlagen wären hilfreich um die vorliegenden Daten zu bestätigen.

Auch die Messwerte an EPDM und Silikonbelüftern, die eine Zunahme der Leistungsfähigkeit nach 1-2 Jahren Gebrauchsdauer aufzeigen, sind durch weitere Messungen zu verifizieren.

Nach längerer Gebrauchsdauer wurde, in den vorliegenden Fällen, häufig eine deutliche Abminderung der Wirtschaftlichkeit festgestellt. Aus den Daten kann keine allgemeine Aussage über die maximale Einsatzdauer abgeleitet werden. Diese Frage ist im Einzelfall technisch zu untersuchen und monetär zu bewerten.

Im laufenden Betrieb sollte nicht auf die Beobachtung der Betriebsstunden der Gebläse und auf die Auswertung des Energieverbrauches für die Belüftung, unter Berücksichtigung der Anlagenbelastung und des Reinigungsergebnisses, verzichtet werden. Im Rahmen einer DWA Arbeitsgruppe wird derzeit das Merkblatt 229 „Systeme zur Belüftung und Durchmischung von Belebungsanlagen“-Teil 2: Betrieb erarbeitet, darin werden auch Angaben zur Ermittlung von Kennzahlen enthalten sein.

8. Literatur

- [1] LOOCK, P. (2009): Veränderung der Leistungsfähigkeit feinblasiger Membranbelüftungselemente unter abwassertechnischen Bedingungen; Schriftenreihe WAR Band 202 (2009); TU Darmstadt
- [2] FREY, W. (2004): Mechanische Reinigung feinblasiger Druckbelüftungselemente; KA – Betriebsinfo 2004 (34), Nr. 2; Hennef, April 2004; (auf www.aabfrey.com zum Download verfügbar)
- [3] FREY, W. (2004): Chemische Reinigung feinblasiger Druckbelüftungselemente; KA – Betriebsinfo 2004 (34) Nr. 4; Hennef, Oktober 2004; (auf www.aabfrey.com zum Download verfügbar)
- [4] FREY, W. (2006): Einflüsse auf die Veränderung des Betriebsverhaltens von Membranbelüftern; Abschlussseminar zum DBU-Projekt: Messverfahren für die Sauerstoffeintragsleistung in Belebungsbecken; 8./9. Mai 2006, Osnabrück; (auf www.aabfrey.com zum Download verfügbar)
- [5] FREY, W. (2009): Maßnahmen zum Erhalt der Leistungsfähigkeit von Belüftern; DWA Fachtagung: Energieeffizienz bei Belüftern und bei der Homogenisierung, 18. Juni 2009 in Neuhausen/Fildern; (auf www.aabfrey.com zum Download verfügbar)
- [6] FREY, W. (2006): Diagnose: zu hoher Druckverlust; KA – Betriebsinfo (36) Nr. 3; Hennef Juli 2006; (auf www.aabfrey.com zum Download verfügbar)
- [7] EN 12255-15 (Dezember 2003): Messung der Sauerstoffzufuhr in Reinwasser in Belüftungsbecken von Belebungsanlagen
- [8] DWA-M209 (April 2007): Messung der Sauerstoffzufuhr von Belüftungseinrichtungen in Belebungsanlagen in Reinwasser und in belebtem Schlamm
- [9] FREY, W. (2010): Endbericht zum KAN Forschungsprojekt „Garantienachweise für die maschinelle Ausrüstung von Kläranlagen - Blockheizkraftwerke“ entnommen werden (www.kan.at → [Download](#))
- [10] FREY, W. (2003) Fragebogen Belüftungssysteme – Ergebnisse der Umfrage im Frühjahr 2003, KAN, Folge 11, 2003
- [11] KRAMPE, J., KAEBERT, S. (2006): Stand der Belüftungstechnik in Baden-Württemberg, Jahresbesprechung der Lehrer des DWA-Landesverbandes Baden-Württemberg, 30. März 2006, Stuttgart
- [12] KRAMPE, J.: Vergleich verschiedener Druckbelüftungssysteme unter Betriebsbedingungen in kommunalen Kläranlagen, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 186, S. 59 - 77, Oldenbourg Verlag, München, 2006

Verfasser:

Dipl.-Ing. Dr. Wilhelm Frey
Leobendorf / Hofgartenstraße 4/2
A-2100 Korneuburg
e-mail: aab.frey@aon.at
internet: www.aabfrey.com