

WIRTSCHAFTLICHER EINSATZ VON BELÜFTUNGSSYSTEMEN

W. Frey, Leobendorf

1. Bauformen von Belüftungssystemen

Von einem Belüftungssystem erwartet man, dass

- Die Mikroorganismen ausreichend mit Sauerstoff versorgt werden.
- Der Beckeninhalt gut durchmischt und Ablagerungen vermieden werden.
- Die verursachten Kosten möglichst gering sind.

Die gestellten Forderungen können durch eine Vielzahl von Konstruktionen gelöst werden. Im wesentlichen wird zwischen **Druckbelüftungssystemen** und **Oberflächenbelüftern** unterschieden.

1.1 Druckbelüftungssysteme

Hierbei wird Luft über Rohrleitungen und Belüfterelemente in das Belebungsbecken eingeblasen. Die Zerteilung des Gases (der Luft) erfolgt beim Austritt durch die Poren bzw. die Löcher oder Schlitze. Der Sauerstoffübergang erfolgt durch im Wasser aufsteigende Blasen.

Die Belüftungselemente werden in Bodennähe angeordnet. Die Belüfterelemente sind, je nach Verfahrensprinzip im gesamten Becken oder in Teilen davon, gleichmäßig über die Beckensohle verteilt.

Man unterscheidet nach dem **Material**. Zum Einsatz kommt

- **Starrporöses Material**: Das sind gesinterte Kunststoffe oder verklebte mineralische Körner.
- **Elastische Membranen**: Als Grundmaterial kommen Elastomere unter anderem EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Terpolymer), PU (Polyurethan) und Silikon zum Einsatz. Die Membranen sind an Grundkörpern befestigt-

Eine weitere Unterscheidung erfolgt nach der **Form der Grundkörper**.

- **Rohr-Belüfter** haben Längen von 0,5 - 1m. Der Rohrdurchmesser schwankt von \varnothing 60 – 80 mm. Als Abgasungsfläche wird der gesamte Umfang angesetzt, da moderne Rohrbelüftungselemente unabhängig vom Material allseitig abgasen.
- **Teller-Belüfter** haben Durchmesser zwischen \varnothing 150 - 500 mm.
- **Platten-Belüfter** Die Abmessungen reichen von 100 – 1000 mm Breite und 500-5000 mm Länge.

Die Menge an Sauerstoff die mit einer Druckbelüftung von den Luftblasen in das Abwasser-Belebtschlammgemisch übertragen wird ist abhängig von:

- der Größe der Luftblasen
- der Luftmenge
- der Einblastiefe
- den Strömungsverhältnissen
- den Abwasserinhaltsstoffen

Die Größe der Luftblasen wird durch das Belüfterelement und dessen **Luftbeaufschlagung** bestimmt. Die Luftbeaufschlagung ist jener Luftvolumenstrom der pro Flächeneinheit und Zeit durch die Gaszerteileroberfläche durchtritt. Die Luftbeaufschlagung der Belüftungselemente wird in Abhängigkeit von deren Form unterschiedlich angegeben. Während der Luftvolumenstrom bei Belüfterrohren auf die Länge des Rohres in Metern bezogen wird [$m_N^3/m/h$], ist bei Tellern der Bezug auf das Element selbst üblich [$m_N^3/Stück/h$]. Bei Plattenbelüftungselementen aus Folienmaterial wird der Luftvolumenstrom mit der Beckengrundfläche in Beziehung gesetzt [$m_N^3/m^2/h$].

Die Strömungsverhältnisse werden von der Anordnung der Belüfter im Becken bestimmt. Eine wichtige Rolle spielt dabei die **Belegungsdichte**. Sie ist das Verhältnis der perforierten Gesamtfläche aller Belüftungselemente zur belegten Belebungsbeckengrundfläche [%].

1.1.1 Leistungsfähigkeit von Druckbelüftungssystemen

Ein Belüftungssystem wird im Wesentlichen durch seine Sauerstoffzufuhrleistung OC [kg/h] und seinen Sauerstoffertrag [kg/kWh] gekennzeichnet. Die Sauerstoffzufuhr wird vorzugsweise für den maximalen Lastfall angegeben, während der Sauerstoffertrag für einen mittleren Betriebszustand hohe Werte annehmen soll.

Die Sauerstoffzufuhr ist maßgeblich durch den Luftvolumenstrom der in das Becken eingeblasen wird, bestimmt. Der Sauerstoffertrag wird von einer Vielzahl von Einflussgrößen z.B. Beckengeometrie, Anzahl und Anordnung der Belüfterelemente im Becken, Art des Druckluftherzeugers, Wirkungsgrad der Antriebsmaschine, usw. bestimmt.

Die Wahl der **Belegungsdichte** und der **Luftbeaufschlagung** beeinflusst maßgeblich die Wirtschaftlichkeit (laufende Betriebskosten) und die Anschaffungskosten der Belüftungseinrichtung. Weiterführende Informationen findet man bei FREY (1996;1998). Als grobe Näherung gilt

- je größer die Belegungsdichte bzw. kleiner die Luftbeaufschlagung ist, desto **teurer aber auch wirtschaftlicher** im Betrieb wird das Belüftungssystem (d.h. größeres OP)
- je kleiner die Belegungsdichte bzw. größer die Luftbeaufschlagung ist, desto **billiger** (weil weniger Gaszerteiler) **aber auch unwirtschaftlicher** im Betrieb wird das Belüftungssystem (d.h. kleineres OP)

Unter mittleren Verhältnissen sind Sauerstoffertragswerte in Reinwasser von ca. 3,5 kg/kWh erzielbar. Unter optimalen Bedingungen, speziell bei hoher Belegungsdichte, können auch größere Werte erreicht werden (PÖPEL, WAGNER 1989).

1.2 Oberflächenbelüftungssysteme

Man unterscheidet Kreiselbelüfter und Stabwalzenbelüfter (Rotoren). Außerdem zählt zur Gruppe der Oberflächenbelüftungssysteme auch die Strahlbelüftung. Hinweise auf Bauformen, Strömungsverhältnisse und das Regelverhalten von Oberflächenbelüftern findet man z. B. bei FREY (1990), KROISS (1991).

1.2.1 Rotor (Stabwalzenbelüfter)

Rotoren haben eine horizontale Welle und werden heute ausschließlich in Umlaufbecken eingesetzt. Sie bestehen aus einer Hohlwelle, an der Sterne aus Flachstäben befestigt sind. Üblicherweise werden Walzenbelüfter heute mit einem Durchmesser von 1 m und Längen von 4,5 bis 9

m angeboten. Die Umfangsgeschwindigkeiten liegen bei 3-4 m/s. Die Antriebsleistung eines 9 m Rotors bei maximaler Eintauchtiefe liegt bei ca. 45 kW.

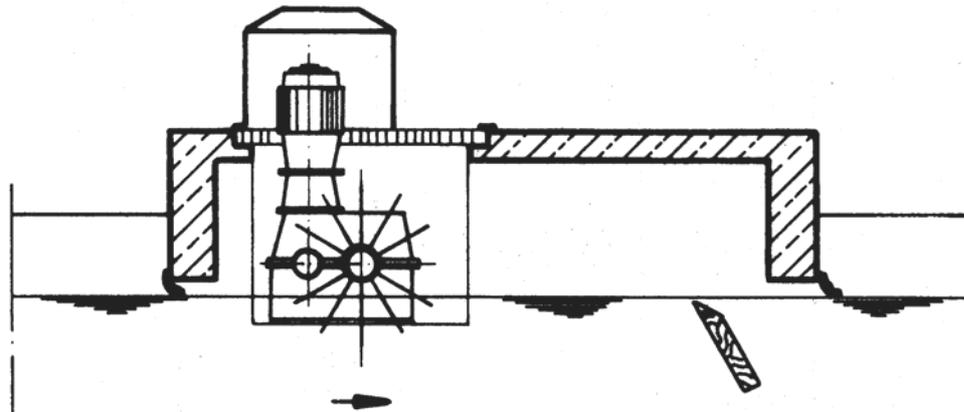


Abbildung 1: Schnitt durch einen Stabwalzenbelüfter

1.2.2 Kreiselbelüfter

Kreisel haben eine vertikale Welle und werden in Mischbecken oder in Umlaufbecken eingesetzt. Sie können in offener oder geschlossener Bauweise ausgeführt werden. Die Wirkungsweise entspricht der eines Pumpenlaufrades. Der in den Wasserkörper hineinragende Kreisel fördert Wasser von unten nach oben und wirft es über der Wasseroberfläche aus. Es werden Kreisel mit Durchmessern von 0,5 bis 4,5 m angeboten. Übliche Umfangsgeschwindigkeiten betragen 4-6 m/s. Die Antriebsleistungen können 150 kW erreichen.

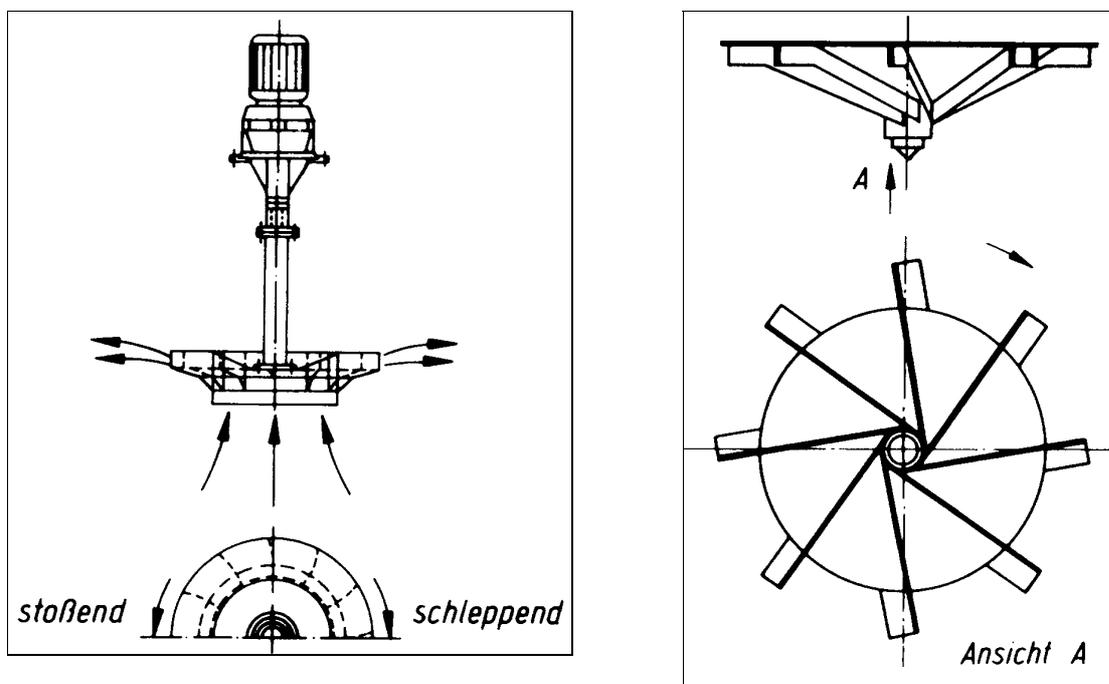


Abbildung 2: Kreiselbelüfter

1.2.3 Leistungsfähigkeit von Oberflächenbelüftungssystemen

Sowohl Stabwalzen als auch Kreisel sind in ihrer Wirtschaftlichkeit durchaus als gut zu bezeichnen. Doch kann man sagen, dass Stabwalzen im Bereich geringer Energiedichten (z.B. 20 W/m^3) ihre optimalen Einsatzgebiete haben, während Kreisel bei hoher Energiedichte (z.B. 100 W/m^3) optimal eingesetzt werden können.

Der Sauerstofftrag unter Betriebsbedingungen liegt bei den Oberflächenbelüftern je nach Belüftungssystem, Beckenform und Abwasserinhaltsstoffen zwischen $1,5$ und $2,0 \text{ kg O}_2/\text{kWh}$. Im Allgemeinen ist der Unterschied zwischen dem Sauerstofftrag unter Reinwasserbedingungen und unter Betriebsbedingungen relativ gering ($\alpha = 0,9 - 1,0$).

Ein wichtiger Vorteil der Oberflächenbelüftungssysteme liegt darin, dass der Sauerstoffeintrag von fast $0 \text{ kg / m}^3 \cdot \text{d}$ bis zur maximalen Belüftungsleistung verändert werden kann und die Durchmischung des Beckeninhaltes bereits bei sehr geringem Energieeintrag gewährleistet ist.

In der **Abbildung 3** ist der Zusammenhang zwischen Eintauchtiefe, der Sauerstoffzufuhr und der Leistungsaufnahme für einen Walzenbelüfter dargestellt.

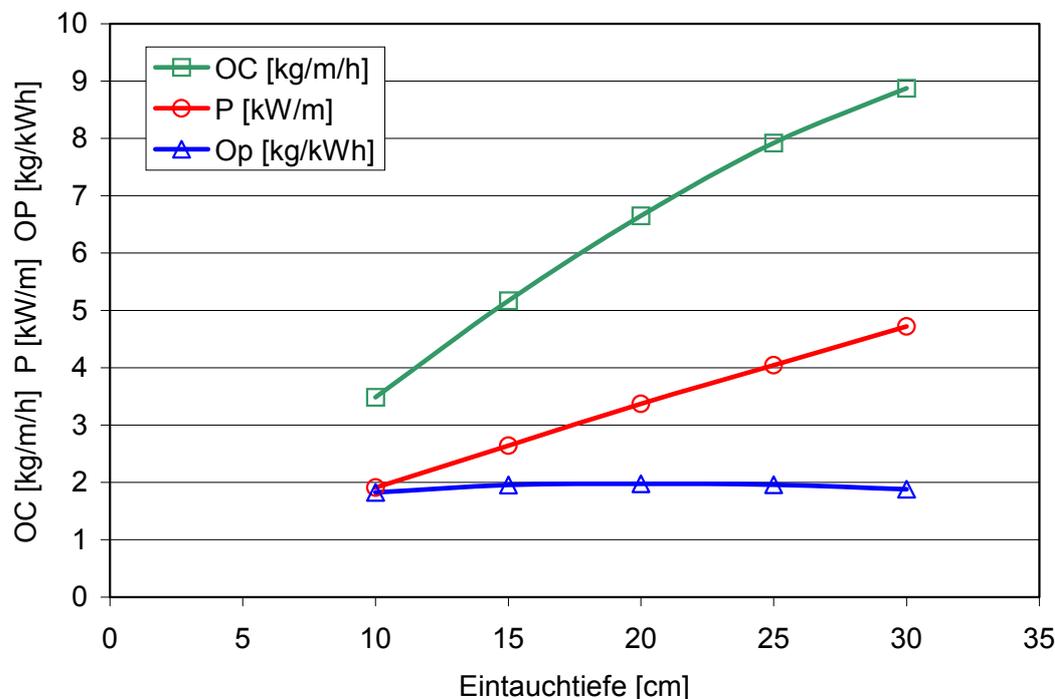


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen OC, P, Op und ET von Mammutrotoren (nach einer Firmenschrift der Fa. Passavant)

2. Stärken und Schwächen der Systeme

In der folgenden Tabelle wird ein Überblick über die Stärken und Schwächen der Druck- und Oberflächenbelüftungssysteme gegeben.

Tabelle 1: Stärken und Schwächen

	Druckbelüftung	Oberflächenbelüftung
Alterung	tritt bei Membranen auf	tritt nicht auf
Beckengeometrie	Grundriss und Tiefe frei wählbar	je nach System enge Grenzen
Betriebssicherheit; Redundanz	mittel bis niedrig	hoch
Emissionen	mittel bis niedrig	mittel bis hoch
Flächenbedarf	im Normalfall kleiner	im Normalfall größer
Lebensdauer	mittel bis gering	hoch
pH-Wert	Beeinträchtigung möglich	kein Einfluss
Regelung	aufwändig, besonders bei großen Anlagen mit vielen Becken bzw. Feldern	einfach
Beckenreinigung	aufwändig (Einbauten an der Sohle)	einfach
Reparatur	in der Regel Beckenleerung erforderlich	in der Regel keine Beckenleerung erforderlich
Schaumbildung	hoch	gering
Verstopfungen	anfällig	nicht anfällig
Wartung	mittlerer bis großer Aufwand	geringer Aufwand
Winterbetrieb	keine Probleme	Probleme mit Eisbildung möglich
Wirtschaftlichkeit in Reinwasser	hoch	mittel bis niedrig
Wirtschaftlichkeit in Abwasser	mittel	mittel

3. Einflussfaktoren auf die Betriebskosten

Im Rahmen dieses Vortrages sollen punktuell zwei Probleme angesprochen werden, die in der letzten Zeit vermehrt aufgetaucht sind. Der erste Problemkreis beschäftigt sich mit dem auftretenden Druckverlust in den Belüfterelementen und der Zweite mit dem Zusammenwirken von Belüftung und Umwälzung in Umlaufbecken.

3.1 Druckverlust

Eine wesentliche Voraussetzung für die störungsfreie Funktion einer Belebungsanlage mit einem Druckbelüftungssystem ist ein verstopfungssicheres Belüftungssystem, das im laufenden Betrieb **keinen** kontinuierlichen Druckanstieg aufweist.

Üblicherweise liegen die saug- und druckseitigen Verluste in den Rohrleitungen und Armaturen jeweils bei 1,0 – 5,0 kPa. Der Druckverlust in den Belüfterelementen ist vom eingesetzten Belüftertyp und der Luftbeaufschlagung abhängig. Im Neuzustand bei mittlerer Luftbeaufschlagung ist mit Druckverlusten der Belüfterelemente in der Größenordnung von 2,0 – 7,0 kPa zu rechnen.

In den letzten Jahren sind vermehrt Fälle bekannt geworden, wo die Drücke deutlich von den Sollwerten abgewichen sind. Die Ursachen waren:

- ungünstig gestaltete Ansaugluftführungen
- mangelhafte Konstruktionen der Saugseite der Gebläse (Schalldämpfer)
- schlechte Montage und Funktion von Rückschlagklappen und Absperrarmaturen auf der Druckseite
- Detailprobleme bei der Verrohrung zu den Belüftern
- Wasser in den Rohrleitungen
- Alterung von Membranen
- verstopfte Belüfterelemente

Das größte und teilweise ungelöste Problem sind Materialveränderungen der Membranen und verstopfte Belüfterporen.

3.1.1 Verstopfte Belüfter

Dass feinblasige Belüfter aus „starrporösem“ Material während der Einsatzdauer einen steigenden Druckverlust aufweisen ist seit langem bekannt (EPA 1989, KELLER 1982). Durch die Anwendung einer intermittierenden Betriebsweise werden auf vielen Anlagen sogenannte Membranbelüfter eingesetzt. Als Grundmaterial kommen Elastomere unter anderem EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Terpolymer), PU (Polyurethan) und Silikon zum Einsatz.

Wie Beobachtungen in den letzten Jahren gezeigt haben, treten auch bei Belüftern aus Elastomeren, zum Teil nach kurzer Betriebszeit (wenige Wochen), deutlich erhöhte Druckverluste auf. Der Betrieb der Kläranlage wird je nach Umfang der Verstopfungen mehr oder weniger stark beeinträchtigt. Folgende Auswirkungen wurden beobachtet:

- Es tritt ein höherer Gegendruck der Belüfter auf, der einen erhöhten Energieverbrauch für die Belüftung verursacht.
- Überlastete Verdichter fallen aus und der Luftvolumenstrom muss reduziert werden.
- Die Belüfterelemente sind beschädigt. Die Schädigung reicht von überdehnten bzw. gerissenen Membranen bis zu verformten bzw. gebrochenen Grundkörpern.

3.1.2 Bekannte Einflussgrößen auf den Druckverlust

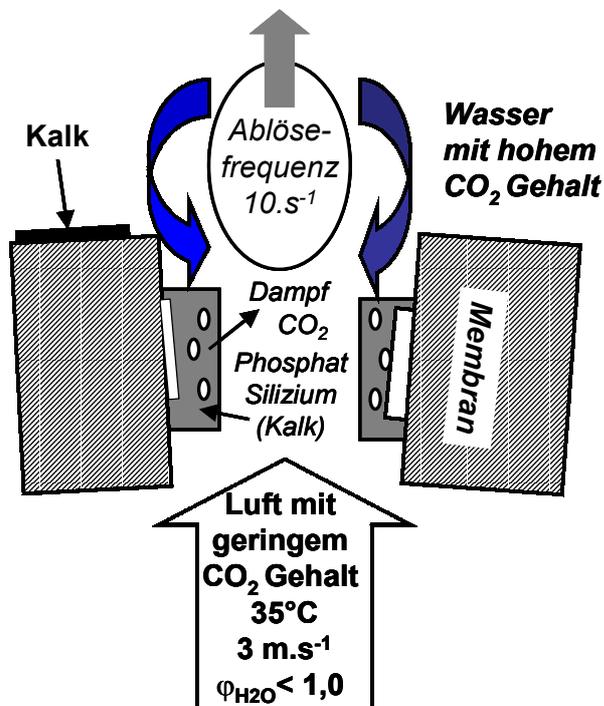
Porengröße: Der Druckverlust eines Belüfterelementes wird durch die Größe der Poren in der Membran bestimmt. Ein Anstieg des Differenzdrucks kann entweder durch gleichmäßige Bildung von verstopfenden Ablagerungen in allen Poren oder durch vollständiges Zuwachsen eines Teiles der Membranporen hervorgerufen werden. In der Praxis treten beide Effekte gleichzeitig auf.

Partikel in der Luft: Verstopfungen feinblasiger Druckbelüftungssysteme durch Partikel die mit dem Luftstrom transportiert werden trifft man heute nur noch selten an. Ursache können Korrosionsprodukte aus den Rohrleitungen und Fasern aus den Luftfiltern sein. Auf den mir bekannten Anlagen mit Belüfterverstopfungen war dieser Beitrag vernachlässigbar gering bis nicht feststellbar.

Veränderungen des Membranmaterials: Es ist bekannt, dass nach einigen Jahren Betrieb ein Verlust von Zuschlagstoffen (z. B. Weichmacher) und den damit einhergehenden Veränderungen der Materialeigenschaften (z.B. Zugfestigkeit, Reißdehnung, IRHD, etc) auftreten kann. Wird das Membranmaterial „fester“, so ist für die selbe Größe der Pore (=Dehnung) eine größere Kraft und damit ein höherer Differenzdruck erforderlich. In den Fällen wo innerhalb weniger Wochen ein deutlicher Druckanstieg beobachtet wird, der nicht zum Stillstand kommt, ist von

der Bildung verstopfender Ablagerungen an der Membran und/oder in den Poren der Membran auszugehen.

Mikroorganismen - EPS (Extrazelluläre Polymere Substanz): Es wird auch die Theorie verfolgt, dass durch bestimmte Mangelerscheinungen (Sauerstoff, Nährstoffe, ...) vermehrt sogenannter „Zwischenraumschleim“ - EPS gebildet wird, der in der Folge die Poren verklebt (WAGNER 2001). Bei den vom Autor untersuchten Anlagen konnte dieses Phänomen bisher nicht beobachtet werden.



Kalk–Kohlensäure–Gleichgewicht: Das Abwasser-Belebtschlammgemisch hat durch die Aktivität der Mikroorganismen einen hohen Gehalt an Kohlendioxid. Die Luft aus der Pore hat einen sehr geringen Kohlendioxidgehalt. Beim ersten Kontakt Luft - Wasser tritt nun örtlich ein rascher Transport von CO₂ aus dem Wasser in die Luft auf, wodurch der pH-Wert steigt und die Löslichkeit von Kalziumcarbonat sinkt. Unter der Annahme, dass während der Blasenablösung immer eine kleine Menge Wasser in die Poren eindringt und die Porenwände mit Belebungsbeckeninhalt benetzt sind, tritt die Abscheidung von Kalk bereits in den Membranporen auf. In der Abbildung 4 ist dieser Vorgang schematisch dargestellt.

Abbildung 4: Schema zur Bildung von Ablagerungen in Membranporen

Weiterführende Informationen zum Problemkreis „Belüfterverstopfungen“ werden bei FREY (2003) gegeben.

3.1.3 Entfernung von Belüfterverstopfungen

Grundsätzlich ist zwischen Reinigungsmethoden bei denen das Belebungsbecken außer Betrieb genommen werden muss, und jenen, wo der Anlagenbetrieb aufrechterhalten werden kann, zu unterscheiden. Die Verfahren mit entleertem Becken können weiter aufgetrennt werden in solche, wo die Belüfter ausgebaut werden und solche, wo die Belüfter nicht ausgebaut werden müssen. Detaillierte Informationen über unterschiedliche Reinigungsmethoden findet man in EPA (1989).

„Konventionelle“ Verstopfungen (z. B. Kalkausfällungen) können mit einer **Säuredosierung** (Ameisensäure, Essigsäure) bekämpft werden (BRETSCHER, HAGER 1983). In manchen Fällen, wenn der Druckanstieg nur langsam fortschreitet, kann es genügen eine Säuredosierung in größeren Zeitabständen als Wartungsmaßnahme, vorzusehen. Auf manchen Anlagen wird, auch vorbeugend, laufend Säure in den Luftvolumenstrom dosiert. Die Methode versagt jedoch bei nicht säurelöslichen Verbindungen (z. B. Kieselsäure).

Die Methode durch **starke Luftbeaufschlagung**, und der damit verbundenen starken Dehnung, Ablagerungen abzusprengen (ATV 1997) wird verbreitet eingesetzt, ist aber nicht immer erfolgreich.

Ein Hersteller von Belüfterelementen gibt für sein Produkt ein **Entspannungsprogramm** vor mit dem ein Druckanstieg verhindert werden soll. Hierbei werden die Belüfterelemente periodisch mit großer Luftbeaufschlagung betrieben und anschließend der Druck im Rohrleitungssystem rasch auf Umgebungsdruck abgesenkt, so dass die Membranen ganz zusammenfallen können. Auf manchen Anlagen konnte damit eine Verbesserung erzielt werden. Beim Einsatz dieser Methode ist jedenfalls auf das Regelkonzept der Anlage, die Reinigungsleistung der Anlage und die Kosten, die durch den veränderten Betrieb der Gebläse entstehen, zu achten.

Guten Erfolg bringt die **mechanische Reinigung** mit einem Hochdruckreinigungsgerät. Vor der Reinigung muss das Becken bis zu den Belüftern entleert werden. Die Belüfter können eingebaut bleiben und werden mit Luft beaufschlagt. Nun wird die Oberfläche mehrmals mit einem Hochdruckwasserstrahl überstrichen. Wichtig ist, dass mit einer **Dreckfräse** gearbeitet wird. Bei leistungsstarken Hochdruckreinigungsgeräten empfiehlt es sich die Belüfterelemente gering mit Wasser überdeckt zu lassen (z.B. 0,1 m).

An einem Tellerbelüfter der Anlage 1 wurde eine Testreinigung im ausgebauten Zustand durchgeführt. Die Abbildung 5 zeigt den Druckverlust in Abhängigkeit des Luftdurchsatzes vor und nach der Reinigung. Nachdem der Beweis der Wirksamkeit der Methode erbracht war wurden alle Belüfter in beiden Becken gereinigt. Der Zeitaufwand für die Reinigung der Belüfterelemente beider Becken, mit Entleeren und Befüllen, betrug ca. 2 Tage.

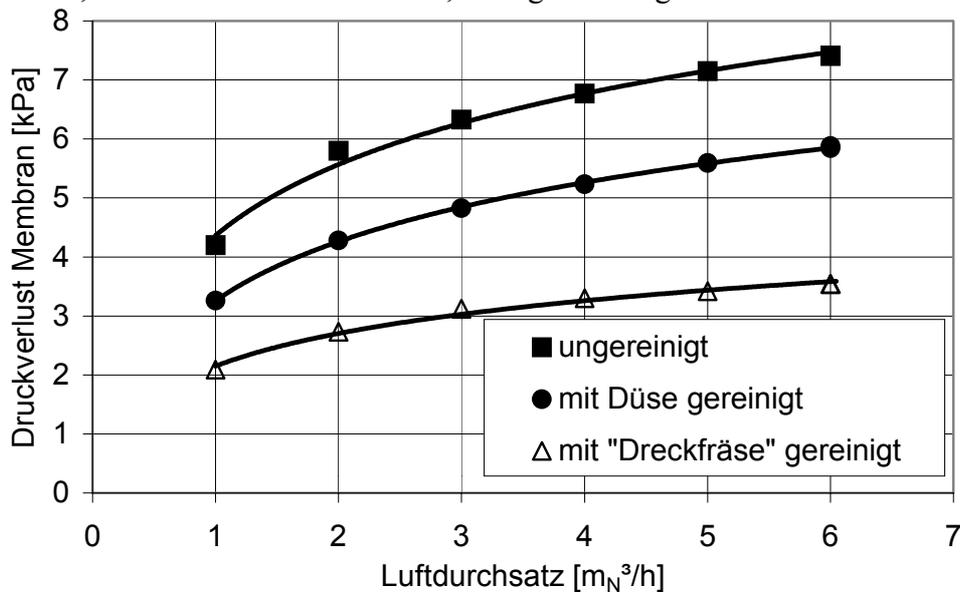


Abbildung 5: Druckverlust einer Membran der Anlage 1 in Abhängigkeit der Luftbeaufschlagung

3.1.4 Neue Methode zur Reinigung

Für den Fall, dass es nicht möglich ist das Becken zu entleeren und/oder andere Methoden nicht funktionieren wurde eine Methode zur Reinigung unter Vollbetrieb der Anlage entwickelt. Die Vorgangsweise ist ähnlich wie die in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie eingesetzte „Cleaning in Process“ (CIP) Methode.

Dazu wird das Rohrleitungssystem mit einer auf die Ablagerungen abgestimmten Reinigungslösung gefüllt und über die Entwässerungsleitung wieder entleert. Die Reinigungslösung besteht in der Regel aus zwei Komponenten die in getrennten Behältern vorgelegt werden. Die Flüssigkeiten werden gleichzeitig z. B. über die Luftleitung in die Verrohrung am Beckenboden gepumpt. Anschließend wird mit der Druckluft die Mischung der Reinigungslösungen durch die Poren gedrückt. Dieser Vorgang wird mehrmals wiederholt um eine ausreichende Einwirkzeit zu erzie-

len. Die Reinigungslösung löst nicht nur Bestandteile der Ablagerungen, sondern unterwandert diese auch und sprengt Teile ab. Diese Wirkung wird durch Tenside und eine gasbildende Komponente der Reinigungslösung erreicht. Auch eingedrungene Biomasse (Schlamm) wird von der Reinigungslösung ab- und aufgelöst und kann so aus den Belüftern und Rohrleitungen entfernt werden.

In vielen Fällen sind keine zusätzlichen Installationen am Belüftungssystem erforderlich. Die Methode nutzt die bestehenden Anlagenteile wie die Falleleitungen, die Entwässerungsleitungen und die Gebläse. Die Auswahl der Reinigungschemikalien kann so erfolgen, dass keine negativen Auswirkungen auf den Reinigungsprozess und/oder die Ablaufqualität befürchtet werden muss.

Die Folgenden Abbildungen zeigen die Anwendung der Methode auf einer großen Kläranlage in der Türkei. Die Abbildung 6 zeigt die Vorlagebehälter für die Reinigungsflüssigkeit und die Abbildung 7 zeigt das Ausströmen der Reinigungsflüssigkeit aus den Belüftern. Zur Überprüfung der Reinigungswirkung wurden Membranen entnommen und mit einer Elektronenstrahlmikrosonde untersucht.



Abbildung 6: Vorlagebehälter für Reinigungsflüssigkeit



Abbildung 7: Ausströmen der Reinigungsflüssigkeit

In Abbildung 8 ist eine ungereinigte Pore zu sehen, man erkennt die verstopfenden Ablagerungen aus anorganischem Material (vor allem Silizium / Kieselsäure). Abbildung 9 zeigt eine Pore nach einer sauren Reinigung mit 1 molarer Salzsäure. Hier ist eindeutig eine Verbesserung zu erkennen, aber es sind auch noch deutlich säureunlösliche Reste der verstopfenden Ablagerungen zu erkennen.



erkennen, aber es sind auch noch deutlich säureunlösliche Reste der verstopfenden Ablagerungen zu erkennen.

Abbildung 8: Ungereinigte Membranpore

Durch das Fluten mit Reinigungslösung konnte bei einer Luftbeaufschlagung von ca. $7 \text{ m}^3/(\text{Belüfter} \cdot \text{h})$ durchschnittlich eine Reduktion des Druckes von 2.0 - 2.5 kPa erreicht werden.

Die letzte Abbildung 10 zeigt eine Pore nach Reinigung mit der alkalischen und oxidierenden Zweikomponenten-Reinigungslösung. Die Pore ist praktisch frei von verstopfenden Ablagerungen und der Druckverlust entspricht demjenigen einer unbenutzten Membran.

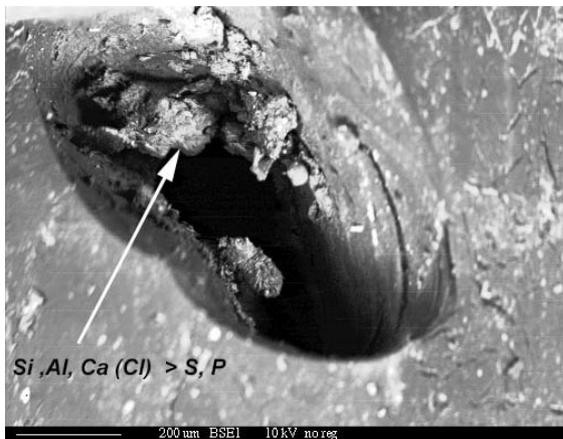


Abbildung 9: Sauer gereinigte Membranpore

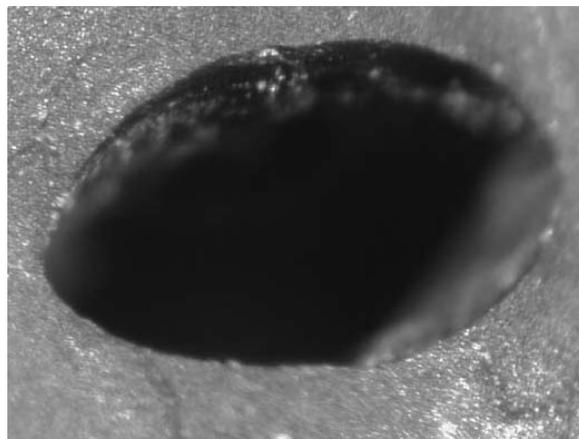


Abbildung 10: Alkalisch gereinigte Membranpore

3.1.5 Kosten - Nutzen – Betrachtung der Reinigung von Belüfterelementen

Bei Problemen mit verstopften Belüftern empfiehlt es sich jedenfalls die Kosten für die geplanten Maßnahmen abzuschätzen und dem Nutzen gegenüberzustellen

In der Regel am einfachsten und schnellsten ist der Austausch der Belüftermembranen durchzuführen. Diese Maßnahme ist jedoch nur dann empfehlenswert, wenn die Belüfter beschädigt sind, bereits ein gewisses Alter (z.B. 3 Jahre oder mehr) haben oder nur geringen Stückzahlen benötigt werden. Außerdem sollte sichergestellt sein, dass das vorhandene Problem damit gelöst werden kann und nicht in kurzer Zeit, auch mit den getauschten Belüftern, wieder auftritt.

Das Beaufschlagen der Belüfter mit hohen Volumenströmen und das „Entspannungsprogramm“ können in Einzelfällen (z.B. bei noch nicht ausgelasteten Anlagen) Zusatzkosten für die Druckluftzeugung verursachen.

Die Reinigung von Belüftern mittels Säuredosierung ist in der Regel recht einfach und verursacht geringe Investitions- und Betriebskosten. Voraussetzung für die Anwendbarkeit ist, dass die Verstopfungen mit Säure aufgelöst werden können und dass die Materialbeständigkeit der mit der gewählten Säure in Kontakt stehenden Anlagenteile gewährleistet ist.

Das Befüllen der Luftleitungen mit Reinigungslösung bietet sich speziell bei großen Anlagen oder bei Anlagen, wo eine Entleerung nicht möglich ist an. Die Kosten für die Reinigungslösung sind abhängig von den erforderlichen Komponenten (abhängig von der Art der Ablagerungen) der Reinigungslösung und dem zu befüllenden Rohrleitungsvolumen. Als Richtwert kann mit € 400,- je Kubikmeter Reinigungslösung gerechnet werden. Jedenfalls sind chemische Voruntersuchungen zur Festlegung der Rezeptur der Reinigungslösung erforderlich bzw. in Hinblick auf eine Minimierung des Chemikalieneinsatzes sinnvoll. Die erforderlichen Behälter, Rohrleitungen und Pumpen können als mobile Einheit mit Bedienpersonal gemietet werden.

Der **Nutzen** der aus der Reduktion des Druckverlustes zu ziehen ist, liegt in geringeren Energiekosten für die Gebläse, in der geringeren Beanspruchung der Gebläse aber ganz wesentlich im **Gewinn an Betriebssicherheit** (kein Ausfall der Gebläse durch Überlast; keine beschädigten Belüfter).

Die **Energiekostensparnis** ist näherungsweise gleich dem prozentuellen Anteil der Druckerhöhung im Gesamtsystem. Am Beispiel der Kläranlage 1 wurde durch die Reinigung (bei 3 m_N³/Stk./h) eine Reduktion von 6,4 auf 3,0 kPa erreicht. Daraus ergibt sich bei einer Einblastiefe von 3,8 m und üblichen Rohrleitungsverlusten von ca. 5 kPa eine Reduktion des Gegendruckes von ca. 7 %, dementsprechend geht auch der Energieverbrauch der Belüftung um 7% zurück.

3.2 Belüfteranordnung in Umlaufbecken

Viele Anlagen werden heute mit Umlaufbecken ausgeführt. Dem Zusammenspiel Beckengeometrie – Belüfteraufteilung – Rührwerksposition wird in der Regel zu wenig Beachtung geschenkt (FREY 1998; 2002). Ziel muss es sein, dass mit möglichst geringer Rührwerksleistung Ablagerungen vermieden werden und eine, verfahrenstechnisch erwünschte, Umlaufströmung erzielt wird. Gleichzeitig darf die Strömung die Sauerstoffzufuhr des Belüftungssystems nicht negativ beeinflussen.

Durch die eingeblasene Luft entsteht eine „Blasenwand“ die einen großen Strömungswiderstand darstellt. Auf vielen Anlagen werden zufolge der Forderung nach Mindestströmungsgeschwindigkeiten (z. B. 0,3 m/s) bei Luftbeaufschlagung große Rührwerksleistungen installiert. Im Mischbetrieb (Denitrifikation) treten dann mitunter hohe Strömungsgeschwindigkeiten (>1 m/s) auf, die auch Schäden an den Einbauten (z. B. Belüfterelementen) verursachen können.

Seit Jahrzehnten ist bekannt, dass die sogenannte Linienbelüftung wegen der Ausbildung einer ausgeprägten Walzenströmung, die die Aufenthaltszeit der Luftblasen im Wasser verkürzt, eine deutlich geringere Sauerstoffzufuhr erbringt als die Flächenbelüftung. Werden nun in einem Umlaufbecken kurze Belüfterfelder eingesetzt, bzw. gibt es Bereiche, wo sich Walzenströmungen ausbilden können, so wird die Sauerstoffzufuhr, wie bei der Linienbelüftung, deutlich kleiner. Durch „Auseinanderziehen“ der Belüfterfelder, oder Einbau zusätzlicher Belüfterfelder, kann der Randwalzeneinfluss verringert und die Situation in der Regel entschärft werden.

Werden in ein Belebungsbecken mehr Belüfterelemente eingebaut und der Luftvolumenstrom nicht verändert, so sinkt der Luftvolumenstrom je Belüfter (die Luftbeaufschlagung). Bei sinkender Luftbeaufschlagung steigt die Sauerstoffausnutzung und damit die Sauerstoffzufuhr und der Sauerstoffertrag. Gleichzeitig wird auch der Luftvolumenstrom pro Quadratmeter Becken Grundfläche (in anderen Bereichen der Technik wird dieser Wert Leerrohrgeschwindigkeit genannt) reduziert. Durch die Reduktion der Luft pro Volumeneinheit wird der „Wandeffekt“, der die Umlaufströmung bremst, verringert.

Eine deutliche Reduktion der hydraulischen Verluste kann durch die (zusätzliche) Anordnung von Belüftern in einer Umlenkung erzielt werden. Dadurch kann, bei vergleichsweise geringer Rührwerksleistung, eine sehr ausgeprägte Umlaufströmung erreicht und die Ausbildung von Walzenströmungen reduziert oder verhindert werden.

3.2.1 Anwendungsbeispiel

Die Anlage 2 hat zwei Umlaufbecken mit je 30 m Länge einer Fließbreite von 6 m und einer Wassertiefe von 6 m. Auf einer Langseite waren die Belüfter und auf der andern Seite die Rührwerke (2 x 1,8 kW) installiert. Die, nach der Fertigstellung durchgeführten, Sauerstoffzufuhrmessungen hatten eine viel zu kleine Sauerstoffzufuhr erbracht. In Tabelle 2 sind die Anlagenparameter und die Messergebnisse zusammengestellt.

Tabelle 2: Anlagenparameter und Messwerte

	Auslegung	vor Umbau	nach Umbau
Belüfteranzahl	210	210	433
Luftvolumenstrom [m_N^3/h]	1160	1160	1160
Luftbeaufschlagung [$\text{m}_N^3/\text{m}^2/\text{h}$]	138	138	67
Luftbeaufschlagung [$\text{m}_N^3/\text{Stk}/\text{h}$]	5,5	5,5	2,7
Belegte Bodenfläche [m^2]	60	60	144
Leerrohrgeschwindigkeit [$\text{m}_N^3/\text{m}^2/\text{h} = \text{m}/\text{h}$]	19,3	19,3	8,1
Sauerstoffzufuhr [kg/h]	105	78	118

Der optische Eindruck der Strömung war sehr schlecht, es traten extreme Rückströmungen auf. Ein Sanierungsversuch mit diversen Maßnahmen brachte nicht den gewünschten Erfolg. In einem zweiten Schritt wurden zusätzliche Belüfterelemente in eine Umlenkung eingebaut. Der Erfolg der Maßnahme war schon anhand der Strömungsbildung nach dem Umbau sehr eindrucksvoll. Die Rückströmung war vollkommen verschwunden und es zeigte sich ein Blasenanstieg wie aus dem Lehrbuch. Die Sauerstoffzufuhrmessung hat deutlich gesteigerte Werte ergeben. Die Abbildung 11 zeigt links die Einbausituation im Original und rechts nach dem Einbau zusätzlicher Belüfterelemente.

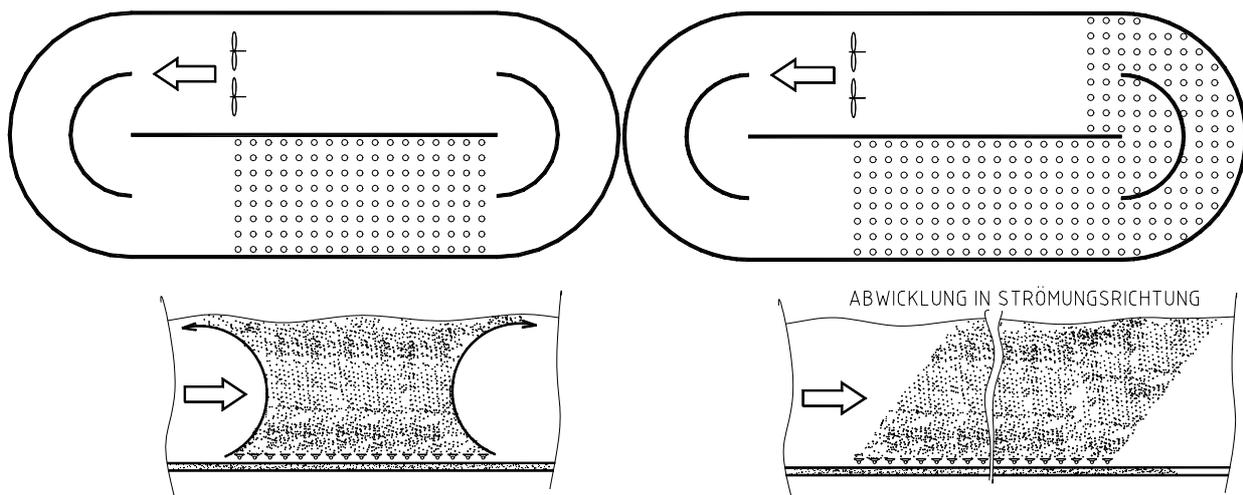


Abbildung 11: Belüfteranordnung und Strömungsbildung

Wegen einer fehlenden Absperrarmatur konnte der Fall, hohe Luftbeaufschlagung und alleiniger Betrieb der „neuen“ Belüfter in der Kurve, nicht getestet werden.

4. Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Die Entscheidung darüber welches Belüftungssystem eingesetzt werden soll wird häufig von der Frage nach den Anschaffungskosten und dem Sauerstofftrag dominiert. Im Folgenden wird anhand von theoretischen Überlegung und Datenauswertungen versucht einen Beitrag zur Entscheidungsfindung zu liefern.

4.1 Theoretische Überlegungen zum Energieverbrauch

In die Energiekosten ist jedenfalls der gesamte Energieaufwand für die Biologie einzurechnen. Die in Umlaufbecken mit Druckbelüftung vorhandenen Rührwerke laufen in der Regel durch.

Um auch während der Belüftungsphasen eine Umlaufströmung aufrecht zu erhalten, muss die installierte Leistung relativ hoch sein. Wenn die Anforderungen an die Stickstoffentfernung hoch sind, müssen in der Regel auch in Umlaufbecken mit Stabwalzen Rührwerke eingebaut werden. Da diese aber nur ohne zusätzliche Luftbeaufschlagung die Strömung aufrecht zu erhalten haben, kann deren spezifische Leistung geringer angesetzt werden.

Es wird im Folgenden eine Betrachtung des Energieaufwandes für das Belebungsbecken durchgeführt. Als veränderliche Parameter sind der Sauerstoffverbrauch und die Op-Werte der Druck- und Oberflächenbelüftungssysteme enthalten. An Annahmen wurden getroffen:

- spezifische Rührwerksleistung für Druckbelüftung $2,5 \text{ W/m}^3$ und $1,5 \text{ W/m}^3$ für Oberflächenbelüftung.
- Sauerstoffgehalt in der Biologie $1,5 \text{ mg/l}$
- Intermittierende Betriebsweise. Bei kleinen Atmungen wurden 40% Nitrifikation und 60 % Denitrifikation als Belüftungszeit angesetzt. Bei hohen Atmungen wurde das Verhältnis umgekehrt. Bei Druckbelüftung laufen die Rührwerke durch und bei Oberflächenbelüftern werden sie während der Belüftungsphase abgestellt.
- konstanter Sauerstoffertrag über den Regelbereich

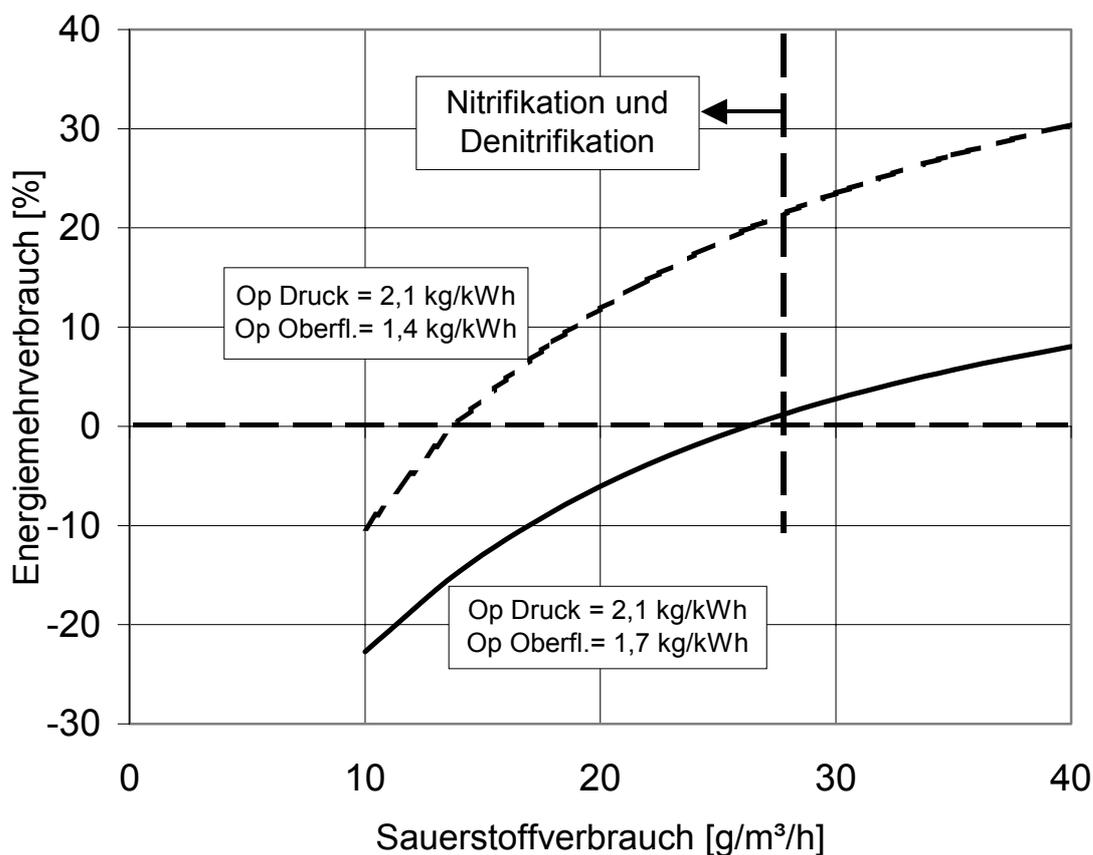


Abbildung 12: Energiemehrverbrauch – Sauerstoffverbrauch

In der **Abbildung 12** ist der Energiemehrverbrauch eines Oberflächenbelüftungssystems gegenüber einem Druckbelüftungssystem in Abhängigkeit vom Sauerstoffverbrauch aufgetragen. Die Sauerstofferträge beziehen sich auf belebten Schlamm. Durch den dauernden Betrieb der Rührwerke ist die erforderliche Leistung für die Mischung bei kleinen Atmungen im Verhältnis zur

Belüfterleistung deutlich erhöht. Der geringere Sauerstofftrag der Oberflächenbelüftungssysteme wird dadurch kompensiert. Je größer die Differenz der Sauerstoffträge zwischen den Systemen ist desto größer wird der Energiemehrverbrauch.

Bei Anlagen mit Nitrifikation - Denitrifikation liegt der Sauerstoffverbrauch unter 25 – 30 g/m³/h. Die Kurven in **Abbildung 12** zeigen, dass mit Druckbelüftungssystemen nicht in jedem Fall ein geringerer Energiebedarf für den Betrieb der Biologie erreicht wird. So liegt der rechnerische Vorteil, unter mittleren Verhältnissen, bei ca. 10%. Bei sehr niedrig belasteten Anlagen (z.B. gleichzeitige aerobe Schlammstabilisierung) ergeben sich, unter den getroffenen Annahmen, sogar Vorteile für die Oberflächenbelüftungssysteme.

4.2 Vergleich von Anlagendaten

In Österreich wurde 2000-2001 ein Forschungsprojekt "Erfassung und Vergleich von technischen und wirtschaftlichen Kennzahlen in der Siedlungswasserwirtschaft – Benchmarking SWW" durchgeführt (Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft 2001; KROISS 2002). Es war der Versuch, Leistungs- und Effizienzunterschiede zwischen einzelnen Kläranlagen transparent zu machen. Es haben daran 88 Abwasserreinigungsanlagen verteilt über ganz Österreich teilgenommen. Davon waren 46 mit Druckbelüftungssystemen und 17 mit Oberflächenbelüftungssystemen ausgerüstet. Auf den restlichen Anlagen sind Misch- bzw. Sonderbauformen von Belüftungssystemen installiert. Die Anlagen wurden in fünf Größenklassen eingeteilt und die Gesamtkosten vier Prozessen zugewiesen. Der festgelegte Prozess 2 wird im Wesentlichen von der biologischen Reinigungsstufe und damit von den Kosten des Belüftungssystems dominiert. Der gesamte Bericht steht im Internet als Download unter www.Lebensministerium.at/Publikationen zur Verfügung.

Von den Autoren der Studie wurde auch eine Auswertung des Energieverbrauches und der Betriebskosten des „Prozesses 2 – biologische Reinigung“ durchgeführt. Unterschieden wurden die Anlagen nach ihrer Größenklasse und dem eingesetzten Belüftungssystem.

Für die Beurteilung der Kosten der Sauerstoffzufuhr sind die Betriebskosten des Prozesses 2 maßgebend. In **Abbildung 13** wurden die spezifischen Betriebskosten des Prozesses 2 nach dem Belüftungssystem gruppiert. Der Median der spezifischen Betriebskosten des Prozesses 2 der 46 Anlagen mit Druckbelüftungssystemen beträgt 5,5 €/EW-CSB110/Jahr. Die mittleren Betriebskosten der 17 Anlagen mit Oberflächenbelüftern betragen 5,9 €/EW-CSB110/Jahr, dh. Anlagen mit Druckbelüftungssystemen weisen im Prozess 2 ca. 7 % geringere Betriebskosten aus als Oberflächenbelüftungssysteme. Im Hinblick auf die Betriebskosten kann demzufolge kein signifikanter Unterschied zwischen Druck- und Oberflächenbelüftern festgestellt werden. Die untersuchten Turbinenbelüfter haben im Mittel wesentlich höhere Kosten als Oberflächen- und Druckbelüfter, aufgrund der geringen Stichprobe kann jedoch keine seriöse allgemeine Aussage bezüglich ihrer Effizienz gemacht werden.

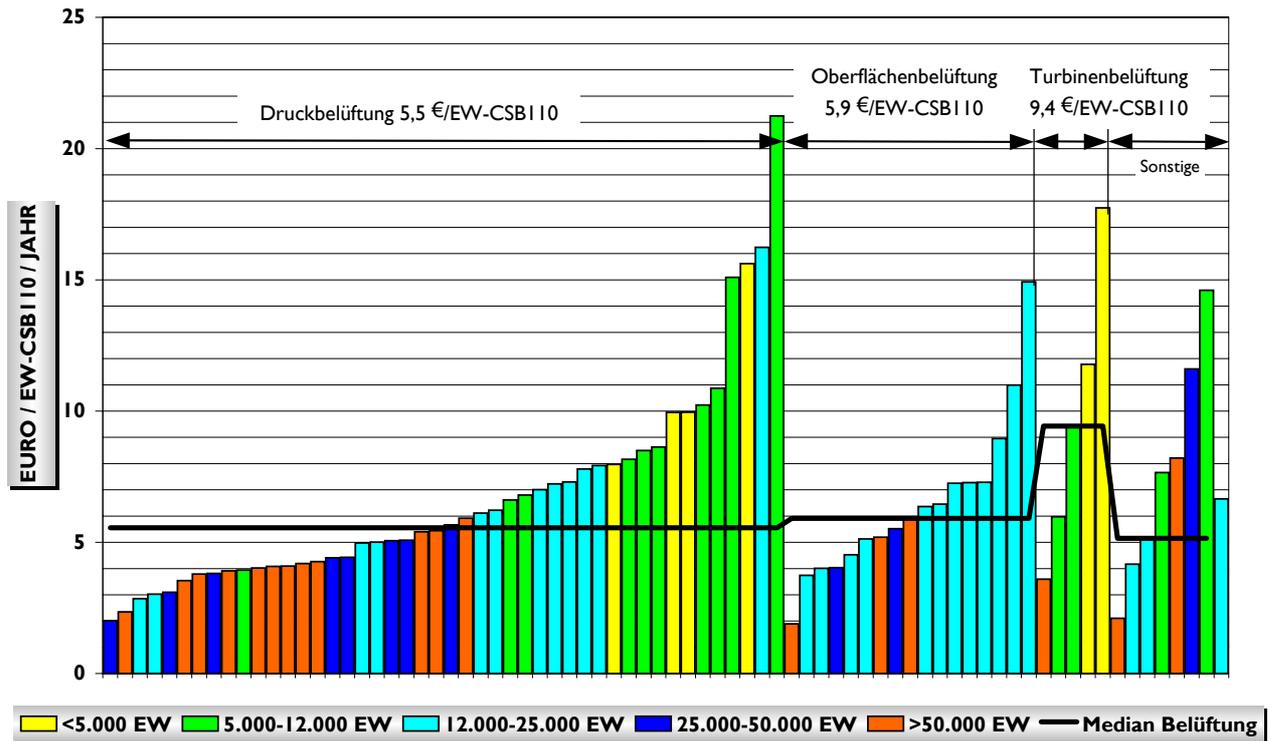


Abbildung 13: spezifische Betriebskosten „Prozess 2 - Biologische Reinigung“ gruppiert nach dem Belüftungssystem

Der Energieverbrauch des Prozesses 2 ist zum überwiegenden Teil durch das Belüftungssystem inklusive der Rührwerke bestimmt. Es wurde daher auch ein Vergleich der Systeme nach dem spezifischen Energieverbrauch durchgeführt. In Abbildung 14 wurden die Anlagen nach Belüftungssystemen gruppiert und nach dem spezifischen Energieverbrauch (bezogen auf die CSB Zulaufkraft in kg/d) gereiht. Es zeigt sich ein ähnliches Ergebnis wie beim Vergleich der Kosten. Der Median der Anlagen mit Druckbelüftungssystemen liegt bei 0,54 kWh/kg-CSBzu und jener von Oberflächenbelüftungssystemen bei 0,61 kWh/kg-CSBzu.

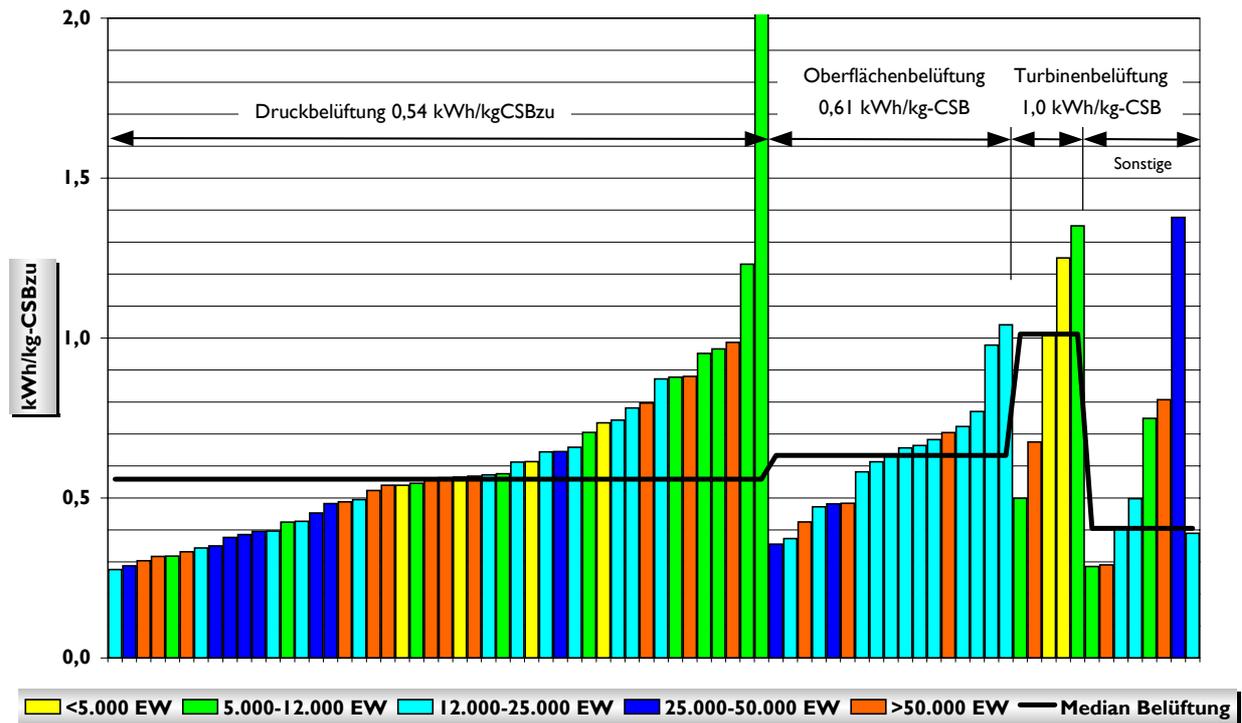


Abbildung 14: spezifischer Energieverbrauch „Prozess 2 - Biologische Reinigung“ gruppiert nach dem Belüftungssystem

Der spezifische Energieverbrauch des Prozesses 2 von Anlagen mit Druckbelüftungssystemen ist um ca. 11 % geringer als jener von Anlagen mit Oberflächenbelüftungssystemen. Auch hier konnte kein signifikanter Unterschied zwischen Druck- und Oberflächenbelüftern festgestellt werden. Blickt man zurück auf die Ergebnisse der theoretischen Betrachtungen zum Energieverbrauch in Punkt 9.1 so ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit den dort ermittelten 5-10 % Energiemehrverbrauch der Oberflächenbelüftungssysteme.

Obige Resultate bestätigen die Tatsache, dass der Sauerstoffertrag ein wesentliches Kriterium bei der Auswahl des Belüftungssystems ist, aber sein Einfluss auf die Gesamtkosten zu hoch bewertet wird. Die Aussage von v. d. EMDE (1980) hat nach wie vor Gültigkeit.

*„Ein echter **Kostenvergleich** verschiedener Belüftungssysteme ist nur über die **Jahreskosten** (Kapitalkosten und Betriebskosten) der gesamten Abwasserreinigungsanlage möglich. Nur die Unterschiedlichen Anschaffungskosten und die Energiekosten der Belüftungssysteme gegenüberzustellen genügt nicht. Vielmehr sind alle Folgekosten bzw. Einsparungen die sich aus der Reagemöglichkeit, Wartung, Reparatur, etc. ergeben einzurechnen.“*

Den Auswertungen des Benchmarking-Projektes liegen die Daten des Jahres 1999 zugrunde. Bei den Wartungs- und Reparaturkosten ist, zufolge der in letzter Zeit vermehrt aufgetretenen Verstopfungen von Druckbelüftungssystemen, eine große Unsicherheit entstanden. Die daraus resultierenden Folgekosten werden die Medianwerte der Anlagen mit Druck- und Oberflächenbelüftungssysteme noch weiter zusammenrücken lassen.

5. Literatur

- ATV (1997): ATV Handbuch; Biologische und weitergehende Abwasserreinigung, 4 Auflage, Verlag Ernst & Sohn
- Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft : Benchmarking in der Siedlungswasserwirtschaft, Herausgeber Österreichisches Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft 2001, (www.Lebensministerium.at/publikationen)
- BRETSCHER U., HAGER W. H.(1983): Die Reinigung von Abwasserbelüftern, gwf 124, 1983, Heft 6
- v. d. EMDE W.: Entscheidungskriterien bei der Wahl von Belüftungssystemen, Fortbildungskurs „Biologische Abwasserreinigung“, TU Wien, 1980
- EPA (1989): Design Manual „Fine Pore Aeration Systems“, Environment Protection Agency, EPA/625/1-89/023
- FREY W. (1998): Planung und Gestaltung von Belüftungssystemen; Wiener Mitteilungen Band 145; 1998
- FREY W.: Ein Beitrag zur Charakterisierung von Belüftungssystemen für die biologische Abwasserreinigung nach dem Belebungsverfahren mit Sauerstoffzufuhrmessungen, Wiener Mitteilungen Bd. 134 (1996)
- FREY W. (2003): Betriebsprobleme bei Druckbelüftungssystemen; Wiener Mitteilungen Band 183; 2003
- FREY W.: Belüftungssysteme; Wiener Mitteilungen Band 81; 1990
- KELLER U. (1982): Langzeitversuche mit verschiedenen Druckbelüftern und mit Luftmengenregulierung der ARA Altenrhein; Verbandsbericht Nr.: 216, 1982, Verband Schweizer Abwasserfachleute
- KROISS H.: Perspektiven der Anwendung von Oberflächenbelüftern, WAR Band 54, Darmstadt 1991
- KROISS H. (Herausgeber): Benchmarking in der Abwasserentsorgung Wiener Mitteilungen Band 176, 2002 (Internet: Lebensministerium.at/publikationen)
- PÖPEL H. J. u. WAGNER M.: Sauerstoffeintrag und Sauerstofffertrag moderner Belüftungssysteme, Korrespondenz Abwasser 5/1989
- WAGNER M. (2001): Neue Tendenzen bei der Belüftungstechnik; WAR Schriftenreihe Band 134; Seite 1-29

Anschrift des Verfassers:

Abwassertechnische Ausbildung und Beratung
Dipl.-Ing. Dr. Wilhelm Frey
Leobendorf / Hofgartenstraße 4/2
A-2100 Korneuburg

Telefon: ++43 (0) 2262 68173
Fax: ++43 (0) 2262 66385
e-mail: aab.frey@aon.at