



<b>Projekt-Titel</b>	<b>Belüftungssysteme in kalten und warmen Klimaten</b>		
	Verbundprojekt: Exportorientierte FuE auf dem Gebiet Abwasser, Kernprojekt A Abwasserbehandlung, Teilprojekt A2		
<b>Projekt Nr.</b> (intern/extern)	02WA0582 WAR:50000274	<b>Auftraggeber</b>	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF / FZK)
<b>Beginn und Laufzeit:</b>	1/2006, 3 Jahre  Kostenneutrale Verlängerung bis 04/2009	<b>Projektleiter:</b>	Prof. Dr.-Ing. M. Wagner
<b>finanzielle Mittel T€</b>		<b>Mitarbeiterin:</b>	M.Sc. Tobias Günkel
<b>Vertraulich ?</b> ja / nein	nein	<b>Projektpartner:</b> <b>Ansprechperson</b>	Passavang Geiger  Hr. Dr. Zhang

### Hintergrund und Aufgabenstellung

Das aerobe Belebungsverfahren ist national und international eines der vorrangig angewendeten Verfahren zur biologischen Behandlung kommunaler und industrieller Abwässer. Grundlage des Belebungsverfahrens und von wesentlicher Bedeutung für eine betriebssichere und prozessstabile Reinigung des Abwassers ist die Sauerstoffversorgung der Mikroorganismen im Belebungsbecken. Dieser Sauerstoffverbrauch wird durch die Sauerstoffzufuhr über Belüftungssysteme in das Belebungsbecken sichergestellt.

Das Forschungsprojekt „Belüftungssysteme in kalten und warmen Klimaten“ diskutiert die Belüftungssysteme feinblasige Druckluftbelüftung, Injektorbelüftung und Oberflächenbelüftung (Kreislaufbelüftung) in einem Wassertemperaturbereich von 5 °C – 30 °C. Dabei wird auf die Thematik des Sauerstoffverbrauchs und der Sauerstoffzufuhr eingegangen. Die theoretischen Grundlagen beschäftigen sich mit dem Stand der Wissenschaft und Technik bezüglich des biologischen, chemischen und physikalischen Einflusses der Wassertemperatur auf den Sauerstoffverbrauch und die Sauerstoffzufuhr. Es werden Sauerstoffzufuhrmessungen in verschiedenen Versuchsanlagen beschrieben und die Ergebnisse zusammengefasst. Des Weiteren wird die Ermittlung des Sauerstoffverbrauchs im internationalen Vergleich unter Berücksichtigung niedriger und höherer Wassertemperaturen betrachtet. Die Erkenntnisse fließen in ein Berechnungsbeispiel nach dem ATV-Arbeitsblatt A 131 ein. Aus den Ergebnissen werden Schlussfolgerungen in Form von Empfehlungen zu Planung und Betrieb von Belüftungssystemen hergeleitet.



## Vorgehensweise und Ergebnisse

Die praktisch durchgeführten Sauerstoffzufuhrmessungen lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

Die in Reinwasser durchgeführten Sauerstoffzufuhrmessungen zeigen, dass sich die Belüftungssysteme Druckluftbelüftung, Injektorbelüftung und Oberflächenbelüftung in Abhängigkeit der Wassertemperatur gleich verhalten. Bei allen Belüftungssystemen steigt der Belüftungskoeffizient mit steigender Wassertemperatur an.

Die bei Sauerstoffzufuhrversuchen gemessenen  $kLa$ -Werte werden nach allen nationalen und internationalen Messanleitungen auf die Normtemperatur von 20 °C korrigiert. Hierzu findet die Arrhenius-Gleichung mit einem Temperaturkorrekturfaktor von  $\theta = 1,024$  Anwendung. Der im DWA-Merkblatt M 209 angegebene Temperaturkorrekturfaktor  $\theta = 1,024$  kann beibehalten werden.

Über den Belüftungskoeffizient  $kLa_{20}$  und die Sauerstoffsättigungskonzentration  $CS_{,20}$  wird die Standard-Sauerstoffzufuhr  $SOTR$  berechnet. Da beide Parameter bei der Umrechnung auf die Standardtemperatur von 20 °C mit Fehlern behaftet sein können, wirken sich diese Fehler auf die Sauerstoffzufuhr aus und beeinflussen diese somit. Die hier durchgeführten Untersuchungen zeigen aber, dass sich die Sauerstoffzufuhr mit den nach dem DWA-Merkblatt M 209 (2007) vorgeschlagenen Formeln im Mittel gut auf die Wassertemperatur unter Standardbedingungen von 20 °C normieren lässt. Sowohl die Berechnung des Belüftungskoeffizient  $kLa_{20}$  und der Sauerstoffsättigungskonzentration  $CS_{,20}$  funktionieren gut. Es ist darüber hinaus kein relevanter Unterschied zwischen den Belüftungssystemen Druckluftbelüftung, Oberflächenbelüftung und Injektorbelüftung zu erkennen. Unabhängig vom Belüftungssystem kann der bei einer bestimmten Wassertemperatur ermittelte  $SOTR$ -Werte von dem eigentlichen  $SOTR$ -Wert bei 20 °C abweichen. Diese Abweichung kann bei Wassertemperaturen  $< 8$  °C sowie bei Wassertemperaturen  $> 25$  °C bis zu 12 % betragen. Dass diese Messungenauigkeit bei niedrigen und hohen Wassertemperaturen auftreten kann, sollte bei Sauerstoffzufuhrmessungen in kalten und warmen Klimaten beachtet werden. In einem Wassertemperaturbereich zwischen 8 °C und 25 °C liegen die Schwankungen der  $SOTR$ -Werte im Bereich der Messungenauigkeit von 5 %.

Zur Überprüfung der Temperaturabhängigkeit des  $\alpha$ -Wertes wurden mit den Belüftungssystemen Druckluftbelüftung, Injektorbelüftung und Kreislaufbelüftung neben den Reinwassermessung auch Sauerstoffzufuhrmessungen in Belebtschlamm durchgeführt. Die hier durchgeführten Sauerstoffzufuhrmessungen zeigen bei allen Belüftungssystemen keine Abhängigkeit des  $\alpha$ -Wertes von der Wassertemperatur.

Die theoretische Ermittlung des Sauerstoffverbrauchs lässt folgende Schlussfolgerungen zu:

Die Ermittlung des Sauerstoffverbrauchs wird in Deutschland nach der maßgebenden Bemessungsempfehlung, dem ATV-Arbeitsblatt A 131, durchgeführt. Anhand der Darstellung und des Vergleichs von internationalen Bemessungsansätzen kann bezüglich der Temperaturabhängigkeit des Sauerstoffverbrauchs kein Ansatz für niedrige ( $< 10$  °C) oder hohe ( $> 20$  °C) Abwassertemperaturen als besonders geeignet oder ungeeignet angesehen werden. Die Ermittlung des Sauerstoffverbrauchs über das ATV-Arbeitsblatt A 131 liefert im internationalen Vergleich gute und plausible Ergebnisse.



Alle Bemessungsansätze ermitteln den Sauerstoffverbrauch infolge der Kohlenstoffelimination und der Nitrifikation und über den Sauerstoffgewinn durch die Denitrifikation. Die Bemessungsverfahren unterscheiden sich nach der Art der Beschreibung des Kohlenstoffabbaus auf Basis des BSB5 und auf Basis des CSB. Ein weiterer Unterschied in Bezug auf den Kohlenstoffabbau liegt in der Aufteilung des Sauerstoffverbrauchs infolge Substratatmung und endogener Atmung.

Der Einfluss der Wassertemperatur auf den Sauerstoffbedarf äußert sich nur in den Berechnungsansätzen zur Ermittlung des Sauerstoffverbrauchs infolge der Kohlenstoffelimination. Weder bei der Berechnung des Sauerstoffverbrauchs durch die Nitrifikation noch bei dem Sauerstoffgewinn durch Denitrifikationsprozesse wird der Einfluss der Wassertemperatur in den Berechnungsgleichungen berücksichtigt. In den Bemessungsansätzen wird davon ausgegangen, dass bei Anwesenheit von Nitrifikanten auch ausreichend nitrifiziert wird. Somit werden die Nitrifikationsgeschwindigkeit und deren Temperatureinfluss nicht betrachtet und der Sauerstoffverbrauch für die Stickstoffelimination rein stöchiometrisch ermittelt.

Die Grundlage für die Bemessung von Belebungsanlagen stellt das aerobe Schlammalter, das bei allen vorgestellten Ansätzen direkt in Abhängigkeit der Temperatur ermittelt wird. Nachdem das erforderliche Schlammalter feststeht, wird die Überschussschlammproduktion berechnet. Daraus ergibt sich mit dem Trockensubstanzgehalt das Volumen des Belebungsbeckens. Der Temperatureinfluss geht folglich an unterschiedlichen Stellen in die Bemessung ein und schlägt zwangsläufig über z.B. das Schlammalter, den Trockensubstanzgehalt oder das Beckenvolumen in den unterschiedlichen Ansätzen zur Ermittlung des Sauerstoffverbrauches durch. Somit sind alle Ansätze zur Ermittlung des Sauerstoffverbrauchs temperaturabhängig.

Auf Basis der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse wurde eine Beispielberechnung zur Ermittlung des Sauerstoffverbrauchs und der erforderlichen Sauerstoffzufuhr durchgeführt. Die Stoßfaktoren  $f_C$  und  $f_N$  zur Berechnung des Sauerstoffverbrauchs in der Tagesspitze sind im ATV Arbeitsblatt A-131 in Abhängigkeit des aeroben Schlammalters angegeben, allerdings nur in einem Bereich von 4 d - 25 d für  $f_C$  und von 8 d bis 25 d für  $f_N$  und dementsprechend nur für einen Wassertemperaturbereich von 3 °C bis 22 °C für  $f_C$  und von 3 °C bis 15 °C für  $f_N$ . Für einen Wassertemperaturbereich bis von 5 °C bis 30 °C werden Stoßfaktoren abgeleitet dargestellt. Die Stoßfaktoren können länderspezifisch reduziert werden, wenn anstelle der Überwachung der Ablaufkonzentrationen mit 2 h-Mischproben 24 h-Mischproben herangezogen werden. Des Weiteren kann die Bewirtschaftung des Zulaufs durch den Betrieb von Speicher-, Misch- und Ausgleichsbecken bei der Ermittlung der Stoßfaktoren berücksichtigt werden.

Die Berechnung der erforderlichen Sauerstoffzufuhr wurde neben dem Ansatz nach dem ATV-Arbeitsblatt über einen erweiterten Ansatz von Pöpel / Wagner durchgeführt. Der Vergleich zeigt, dass abweichend vom ATV-Arbeitsblatt A 131 der Ansatz von Pöpel / Wagner gewählt werden sollte, da hier die Wassertemperatur sowie die Druckverhältnisse berücksichtigt werden. Die erforderliche Sauerstoffzufuhr wird über diesen Ansatz genauer berechnet als über die Gleichung nach dem ATV-Arbeitsblatt A 131. Die Berechnung über den Ansatz nach Pöpel / Wagner wirkt sich v. a. bei einer Wassertemperatur ab 20 °C und größer sowie auch bei tiefen Belebungsbecken positiv bezüglich der geringeren Gebläseleistung aus. Bei Wassertemperaturen größer 20 °C wird nach ATV A-131 die spez. Sauerstoffzufuhr überschätzt. Wird der weitere Ansatz von



Pöpel / Wagner angewendet, können bei einer Wassertemperatur von 30 °C eine um ca. 10 % niedrigere Sauerstoffzufuhr veranschlagt werden, Bei 25 °C liegt die Sauerstoffzufuhr um ca. 8 % und bei 20 °C um ca. 5 % niedriger. Bei Wassertemperaturen unter 20 °C tritt zwischen den Berechnungsansätzen bezogen auf die Wassertemperatur zwischen 5 °C und 20 °C kein Unterschied auf.

Die Sauerstoffzufuhr ist nach ATV A-131 für die maßgebenden Belastungszustände zu ermitteln. Bei Anlagen ohne Jahresgang tritt der höchste Sauerstoffverbrauch im Sommer auf. In kalten Klimaten sind die Lastfälle für die Wassertemperaturen von 10 °C und 15 °C zu prüfen, in warmen Klimaten für 20 °C und 30 °C.

Nach Ermittlung der Sauerstoffzufuhr erfolgt bei Druckluftbelüftung die Berechnung des erforderlichen Luftvolumenstroms. Der Luftvolumenstrom wird bei Wassertemperaturen zwischen 10 °C und 20 °C üblicherweise mit einem Bereich von 1 bis maximal 2 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>VBB·h) angenommen. Bei Wassertemperaturen unter 10 °C können aufgrund der niedrigeren erforderlichen Sauerstoffzufuhr 0,5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>VBB·h) ausreichen. Bei hohen Wassertemperaturen muss hingegen mit spezifischen Luftvolumenströmen bis zu 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>VBB·h) gerechnet werden. Nach Ermittlung der Luftvolumenströme folgt die Berechnung der Anzahl der benötigten Belüftungselemente. Werden aufgrund der kleineren Luftvolumenströme bei niedrigen Wassertemperaturen zu wenige Belüftungselemente veranschlagt, muss darauf geachtet werden, dass es nicht zu Durchmischungsproblemen kommt. Bei hohen Wassertemperaturen (hohe Luftvolumenströme) muss hingegen geprüft werden, ob die notwendige Anzahl an Belüftungselementen technisch sinnvoll im Belebungsbecken untergebracht werden kann. Dies kann bei ungünstiger Konstellation ab einer Wassertemperatur größer 25 °C zu Problemen führen.

Die Auslegung von Oberflächenbelüftungssystemen und Injektorbelüftungssystemen ist stark vom Einzelfall abhängig. Es gelten für diese beiden Systeme keine allgemeinen Gleichungen oder Auslegungsregeln bezüglich der Leistungswerte, da diese Angaben herstellerspezifisch sind.

Allgemein gilt auch hier, dass im Einzelfall geprüft werden muss, ob bei niedrigen Wassertemperaturen, bei denen eine niedrigere erforderliche Sauerstoffzufuhr ausreichen kann um den Sauerstoffverbrauch sicherzustellen, die notwendige Durchmischung sichergestellt ist. Ebenso ist bei hohen Wassertemperaturen zu prüfen, ob die hohe spezifische Sauerstoffzufuhr technisch sinnvoll in das Belebungsbecken eingetragen werden kann.

## Publikationen

### Vorträge

Wagner, M., Guenkel, T. (2007); Aeration Systems in cold and warm climate regions; Präsentation auf der H2O-Wassermesse Vietnam; 2007

Wagner, M., Looock, P., Guenkel, T. (2007); Design and Operational Aspects of Modern Fine Bubble Aeration Systems, 10th IWA Specialised Conference: Design, Operation and Economics of Large Wastewater Treatment Plants, Proceedings, 9-13 September 2007, Vienna, Austria

Wagner, M., Guenkel, T. (2009); Leistung und Bemessung von Belüftungseinrichtungen; DWA Wasser-Wirtschafts-Kurs N/2, Kommunale Abwasserbehandlung, Kassel; 2009

### Publikationen



	<p>Wagner, M., Looock, P., Guenkel, T. (2007); Design and Operational Aspects of Modern Fine Bubble Aeration Systems, 10th IWA Specialised Conference: Design, Operation and Economics of Large Wastewater Treatment Plants, Proceedings, 9-13 September 2007, Vienna, Austria</p> <p>Wagner, M., Guenkel, T. (2009); Leistung und Bemessung von Belüftungseinrichtungen; DWA Wasser-Wirtschafts-Kurs N/2, Kommunale Abwasserbehandlung, Kassel; 2009</p> <p>Wagner, M., Guenkel, T. (2010) Belüftungssysteme in kalten und warmen Klimaten; in: Gesamtabschlussbericht des BMBF- Verbundprojektes „Exportorientierte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Wasserver- und -entsorgung, Teil II: Abwasserbehandlung und Wasserwiederverwendung“</p> <p>Wagner, M., Guenkel, T. (2010): Belüftungssysteme in kalten und warmen Klimaten, in: Leitfaden des BMBF- Projektverbundes „Exportorientierte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Wasserver- und -entsorgung, Teil II: Abwasserbehandlung und Wasserwiederverwendung“</p>		
<b>Sonstiges</b>			
<b>Beantragt am:</b>		<b>genehmigt/abgelehnt</b>	<b>genehmigt</b>
4/2005			genehmigt 09.12.2005