

SAUERSTOFFZUFUHR  
MESSEN, STEUERN, REGELN

W. Frey

1. MESSUNG DER SAUERSTOFFZUFUHR

Zur Feststellung des Leistungsvermögens von Belüftungssystemen werden Sauerstoffzufuhrversuche durchgeführt. Zur Zeit existieren in der Bundesrepublik Deutschland, Österreich und in den USA verbindliche Vorschriften nur für **Reinwasserversuche**. Für Vergleichszwecke sind Reinwasserwerte sehr brauchbar aber die Anlagenplaner und Anlagenbetreiber interessiert im Hinblick auf eine gesicherte Abwasserreinigung sowie aus Kostengründen das Sauerstoffzufuhrvermögen eines Systems unter **Betriebsbedingungen**.

Im Reinwasser bieten sich sinnvollerweise Versuche mit steigendem Sauerstoffgehalt nach den bestehenden landesspezifischen Vorschriften an.

Versuche unter Betriebsbedingungen können im **Durchlaufbetrieb** und im **Standversuch ohne Rücklaufschlamm und Abwasserzufuhr** durchgeführt werden (KAYSER 1977). Außerdem ist es möglich mit **ansteigendem** Sauerstoffgehalt (Absorptionsversuche) und mit **abnehmendem** Sauerstoffgehalt (Desorptionsversuche) zu arbeiten. Auf Grund der bestehenden theoretischen Zusammenhänge (KAYSER 1982) kann die Auswertung von Desorptionsversuchen analog den Absorptionsversuchen durchgeführt werden.

Weiters kann über eine **gasseitige Stoffbilanz** die Sauerstoffzufuhr ermittelt werden. Die Anwendbarkeit der Sauerstoffausnutzungsmethode (delta O<sub>2</sub>-Methode, off gas-Methode) ist in der Regel auf druckbelüftete abgedeckte Anlagen beschränkt. Der Vorteil liegt in der integralen Erfassung der Sauerstoff-

zufuhr auch bei Durchlaufbetrieb.

Neben diesen bekannten und hinreichend erprobten Verfahren gibt es die Möglichkeit, mit Tracern zu arbeiten (NEAL 1979).

Die Abschätzung der Sauerstoffzufuhr über den Sauerstoffverbrauch (Atmung) und den Sauerstoffgehalt im Belebungsbecken ist zwar die einfachste aber auch die mit den größten Fehlern behaftete Methode. Für die Bestimmung des Sauerstoffverbrauches werden manchmal auch CSB-Bilanzen herangezogen. Da diese aber mindestens eine Woche erfassen muß ergibt sich die Schwierigkeit jenen Sauerstoffgehalt zu finden der dem berechneten Sauerstoffverbrauch zuzuordnen ist um damit die Sauerstoffzufuhr zu errechnen.

### 1.1 Auflüftungsversuche in Reinwasser

Grundsätzlich wird empfohlen nach den jeweiligen Landesvorschriften zu arbeiten. Eine vergleichende Gegenüberstellung findet sich in der Literatur bei (KAYSER 1986). In Österreich gilt für Reinwasserversuche die ÖNORM M5888. Der Grundgedanke der Arbeitsvorschrift wird nur sehr kurz dargestellt und im folgenden auf die kritischen Teile der Versuchsdurchführung eingegangen.

#### 1.1.1 Theoretische Zusammenhänge

Wird sauerstofffreies Wasser belüftet, so steigt der Sauerstoffgehalt zu Beginn schnell und dann immer langsamer, bis ein Endwert, der sogenannte Sättigungswert erreicht ist. Der Endwert wird umso rascher erreicht, je größer das Sauerstoffzufuhrvermögen der Belüftungseinrichtung ist. Die in der Zeiteinheit zugeführte Sauerstoffmenge ist dem jeweiligen Sauerstoffdefizit (Sauerstoffsättigung minus Sauerstoffgehalt im betrachteten Zeitpunkt) proportional. Solche physikalischen

bzw. chemischen Umsetzungsvorgänge werden als Reaktionen erster Ordnung bezeichnet.

Durch folgende Differentialgleichung kann der Belüftungsvorgang beschrieben werden (KAYSER 1967,1977):

$$\frac{dc}{dt} = k_L a \cdot (c_{S,v} - c) \quad \text{Glg.(1)}$$

$\frac{dc}{dt}$	(g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> /h) ...	Sauerstoffzufuhr
$k_L a$	(h <sup>-1</sup> ) .....	Belüftungskoeffizient
$c_{S,v}$	(g/m <sup>3</sup> ) .....	Sättigungswert im Versuch
$c$	(g/m <sup>3</sup> ) .....	Sauerstoffgehalt

Durch Integration der Differentialgleichung ergibt sich:

$$c = c_S - (c_S - c_0) \cdot e^{-k_L a \cdot t}$$

An dieser Stelle soll auf die immer mehr Platz greifende Praxis der Datenerfassung mittels Computer und die damit verbundene Auswertemethode mit Hilfe von Programmen zur Nichtlinearen Regression hingewiesen werden. Unser Institut verwendet derzeit einen tragbaren Personalcomputer mit einer zusätzlich installierten Analog-Digital-Wandlerkarte und einer Meßwert-erfassungssoftware "von der Stange". Die Auswertung der Daten erfolgt mit dem von der ASCE 1984 veröffentlichten Programm.

Ziel der Auswertung ist die Bestimmung des Belüftungskoeffizienten  $k_L a$ . Als Nennleistung der Belüftungseinrichtung ( $OC_{10}$  in mgO<sub>2</sub>/l/h bzw gO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/h) ist die Sauerstoffzufuhr bei einem Sauerstoffgehalt von 0 mgO<sub>2</sub>/l/h, einer Temperatur von +10°C und einem Luftdruck von 1013 hPa definiert.

Da Sauerstoffzufuhrversuche in der Regel nicht unter Standardbedingungen durchgeführt werden können, müssen  $k_L a$  und  $c_S$  auf Standardtemperatur (Index s) umgerechnet werden (in der Praxis mit dem  $f_{T,10}$  Wert). Es gilt:

$$k_{La}(10) = k_{La}(T) \cdot 1,024^{(10-T)}$$

$$c_{s(10)} = c_{s(T)} \cdot (c_{ss(10)}/c_{ss(T)})$$

Das Sauerstoffzufuhrvermögen der Belüftungseinrichtung ( $OC_{10}$ ) ergibt sich nach ÖNORM M5888 zu:

$$OC_{10} = k_{La}(T) \cdot c_{s,T} \cdot f_{T,10} \quad \text{Glg.(2)}$$

- $OC_{10}$  (g O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/h) .. Sauerstoffzufuhrvermögen bei  
T = 10°C, p = 1013 hPa
- $k_{La}(T)$  (h<sup>-1</sup>) ..... Belüftungskoeffizient bei Versuchs-  
temperatur
- $c_{s,T}$  (g/m<sup>3</sup>) ..... Sättigungswert für Sauerstoff in  
destilliertem Wasser bei 1013 hPa und  
Versuchstemperatur
- $f_{t,10}$  (1) ..... Temperaturkorrekturfaktor

Bei Druckbelüftungssystemen ist ein Korrekturfaktor, der den Einfluß der Einblastiefe (ET in Meter) auf den Sättigungswert berücksichtigt, in die Rechnung einzubeziehen. Der korrigierte Sättigungswert ( $c_{s,T-ET}$ ) berechnet sich zu

$$c_{s,T-ET} = c_{s,T} \cdot \left(1 + \frac{ET}{20,7}\right)$$

Der Wert  $OC_{10}$ , der mit dem beschriebenen Verfahren ermittelt wird ist unabhängig von den spezifischen Gegebenheiten bei der Versuchsdurchführung wie Luftdruck, Meereshöhe und Temperatur.

Mit dem Volumen des Belebungsbeckens läßt sich dann die, durch das Belüftungssystem eingetragene Sauerstoffmenge pro Stunde, der Sauerstoffeintrag  $OC^*$ , wie folgt berechnen:

$$OC^* = OC_{10} \cdot V_{BB} / 1000 \quad \text{Glg.(3)}$$

- $OC^*$  (kg O<sub>2</sub>/h) .... Sauerstoffeintrag
- $V_{BB}$  (m<sup>3</sup>) ..... Wasservolumen im Belüftungsbecken

Aussagen über die Wirtschaftlichkeit eines Belüftungssystems können durch die Ermittlung des Sauerstoffertrages ( $O_p$ ) gemacht werden.

Der Sauerstoffertrag ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$O_p = OC^* / P \quad \text{Glg. (4)}$$

$OC^*$  (kg  $O_2$ /h) .... Sauerstoffeintrag  
 $P$  (kW) ..... Leistungsaufnahme der Belüftungseinrichtung  
 $O_p$  (kg  $O_2$ /kWh) .. Sauerstoffertrag

### 1.1.2 Praxis von Reinwasserversuchen

Für die Qualität eines Versuches ist die Zugabe des Natriumsulfites, fest oder vorgelöst, von entscheidender Bedeutung. Wichtig ist eine möglichst **gleichmäßige Verteilung**. Bei Anlagen mit getrennter Umwälzung kann, wenn keine Beeinträchtigung der Belüftungselemente erwartet wird, das Natriumsulfit bei abgestellter Luftzufuhr zugegeben werden. In Druckluftanlagen ohne Mischeinrichtung muß die Chemikaliengabe bei geringster Luftmenge gleichmäßig über die gesamte Beckenoberfläche erfolgen. Oberflächenbelüfter in Umlaufbecken müssen schon während der Natriumsulfitzugabe mit der zu testenden Leistung betrieben werden um stabile Strömungsverhältnisse zu haben.

Die Betriebsweise des Belüftungssystems vor dem Versuch und während der Chemikaliengabe ist im Einzelfall mit dem Lieferanten bzw. Projektanten des Belüftungssystems abzuklären. Hierbei ist speziell auf die Strömungsverhältnisse im Becken und das Verhalten der Belüfterelemente bei Abstellen der Druckluft einzugehen.

Die Frage nach der **Überdosierung** des Natriumsulfits ist mit den hydraulischen Verhältnissen im Belüftungsbecken, der Anlagenauslegung (Hochlastanlage - hohe Sauerstoffzufuhrlei-

stung), der Anlagenkonzeption (tiefe Becken - Übersättigung) und den Umgebungsbedingungen (Wassertemperatur) verbunden. Die sich in manchen Fällen ergebenden Überdosierungen sind nicht immer praktikabel. In der Versuchspraxis kommt man, wie viele Versuche gezeigt haben, mit maximal 100% Überdosierung aus.

Die Anbringung der Sauerstoffsonden muß so erfolgen, daß eine ausreichende Anströmgeschwindigkeit gewährleistet ist, eventuell sind Anströmeinrichtungen vorzusehen. Durch den vermehrten Einsatz von flächigen Druckbelüftungssystemen ist die Forderung die Sonden nicht im direkten Blasenauftiegsbereich anzuordnen in manchen Fällen nicht zu erfüllen. Hier muß durch geeignete Sondenanordnung, z.B. mit nach oben oder zur Seite gerichteten Sondenköpfen, eine Beeinflussung des Meßwertes durch aufsteigende oder hängenbleibende Blasen vermieden werden.

Zur Beurteilung des Belüftungssystemes ist die Erfassung der Antriebsleistung von Verdichtern, Umwälzpumpen und Mischeinrichtungen notwendig. Eine Feststellung der anderen Anlagenparameter wie z.B. Treibwassermenge oder Luftdurchsatz ist, schon zu Vergleichszwecken, günstig. Die Erfassung dieser Daten ist oftmals recht aufwendig, z.B. bei direkt über Gasmaschinen getriebenen Turboverdichtern, und wird da in den wenigsten Fällen geeignete, dh. aber auch mit ausreichender Genauigkeit arbeitende, Meßgeräte auf den Anlagen installiert sind häufig zu wenig beachtet und unterschätzt.

### 1.2 Durchführung von Versuchen unter Betriebsbedingungen

Unter sonst gleichen Bedingungen können sich zwischen Betriebsverhältnissen und Reinwasser unterschiedliche  $k_{La}$ - und  $c_s$ -Werte ergeben. Die Abweichungen der Betriebsverhältnisse von den Reinwasserbedingungen werden durch die Faktoren  $\alpha$  und  $\beta$  erfaßt.

$$k_{L,a}(\text{Betrieb}) = \alpha \cdot k_{L,a} = k_{L,a}'$$

$$c_s(\text{Betrieb}) = \beta \cdot c_s = c_s'$$

### 1.2.1 Absorptions- und Desorptionsversuche nach KAYSER

Die Versuchstechnik ist bei KAYSER (1977,1982) ausführlich beschrieben und soll hier nur ansatzweise dargestellt werden.

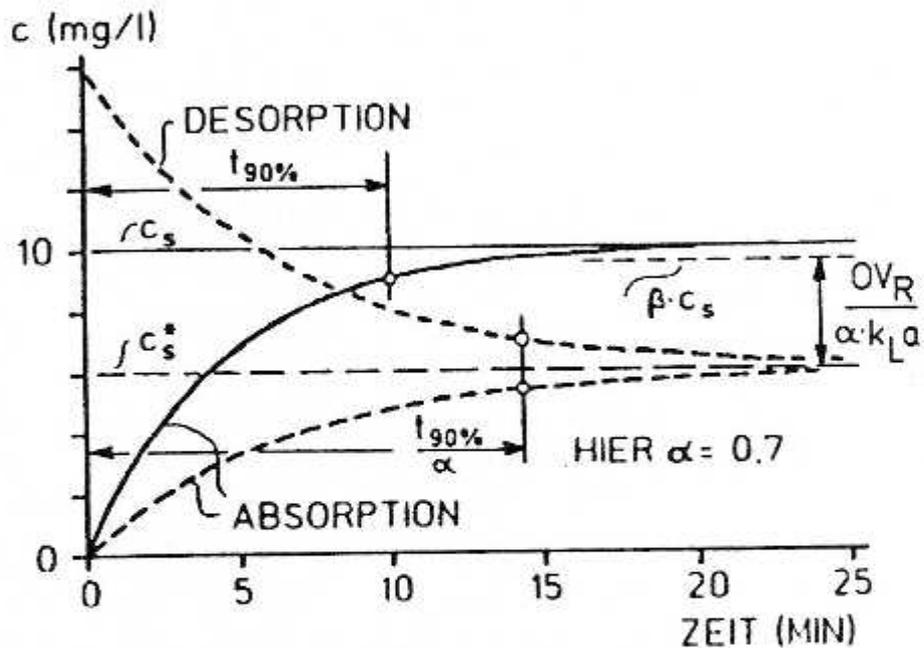


Abb.1: Sauerstoffzufuhr im Standversuch mit belebtem Schlamm (aus KAYSER 1986)

Der Sauerstoffgehalt wird bei Versuchsbeginn entweder durch Drosselung der Belüftung stark abgesenkt oder durch Zugabe von Wasserstoffperoxid künstlich erhöht. Wird hiernach die Belüftung wieder eingeschaltet, so beginnt sich der Sauerstoffgehalt zu verändern und nimmt nach einer gewissen Zeit einen konstanten Wert (virtuelle Sättigung  $c_s^*$ ) an. Der Vorgang ist in Abbildung 1 dargestellt.

Für Versuche mit steigendem Sauerstoffgehalt ohne Abwasser- und Rücklaufschlammzufuhr gilt die von HIXON und GADEN (1950) genannten Differentialgleichung

$$\frac{dc}{dt} = k_L a' \cdot (c_S' - c) - OV_R \quad \text{Glg. (5)}$$

$\frac{dc}{dt}$	(g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> /h)	... Sauerstoffzufuhr
$k_L a'$	(h <sup>-1</sup> )	..... Belüftungskoeffizient Betrieb
$c_S'$	(mg/l)	..... Sättigungswert Betrieb
$c$	(mg/l)	..... aktueller Sauerstoffgehalt
$OV_R$	(mg/l/h)	..... Atmung des belebten Schlammes

Die (')-Zeichen sollen andeuten, daß die Werte unter Betriebsbedingungen gemessen wurden. Wenn  $OV_R$  sich während des Versuchs nicht ändert, was in Anbetracht der Kürze der Versuche zu ermöglichen ist, und  $c$  gleich dem "virtuellen Sättigungswert"  $c_S^*$  ist, gilt  $dc/dt = 0$  (da sich der Sauerstoffgehalt ja nicht mehr verändert). Mit diesen Randbedingungen erhält man aus Gleichung 5

$$OV_R = k_L a' (c_S' - c_S^*) \quad \text{Glg. (6)}$$

Wird dies wieder in Glg. 5 eingesetzt, erhält man

$$\frac{dc}{dt} = k_L a' \cdot (c_S^* - c) \quad \text{Glg. (7)}$$

Diese Beziehung ist fast identisch mit der Auswerteformel (1) für Reinwasserversuche. Anstatt der tatsächlichen Sättigungsdefizite  $c_S - c$  sind bei der Auswertung von Standversuchen mit belebtem Schlamm die virtuellen Sättigungsdefizite ( $c_S^* - c$ ) zu verwenden. Die Sauerstoffzufuhr ergibt sich zu:

$$OC = k_L a' \cdot c_S' = k_L a' \cdot c_S^* + OV_R \quad \text{Glg. (8)}$$

worin  $c_S'$  der Sättigungswert des Belebtschlamm-Wassergemisches unter Versuchsbedingungen ist. Die Bestimmung des Sättigungswertes  $c_S'$  kann mit verschiedenen Methoden durchgeführt werden. Der Sättigungswert unter Betriebsbedingungen  $c_S'$  wird mit Filtrat aus dem Belebungsbecken bestimmt. Theoretisch

können Unterschiede zwischen diesen im Filtrat bestimmten und den in destilliertem Wasser gemessenen Sauerstoffsättigungswerten auftreten ( $\beta$ -Wert in ÖNORM M5888). Praktisch liegen diese Unterschiede im Bereich der Meßgenauigkeiten. Um  $c_S'$  zu bestimmen ist es notwendig, neben  $c_S^*$  auch  $OV_R$  zu messen, schon um sicher zu sein, daß sich die Atmung  $OV_R$  während des Versuches nicht änderte. Durch Umformen der Gleichung 6 erhält man

$$c_S' = c_S^* + \frac{OV_R}{k_{La}'} \quad \text{Glg. (6)}$$

Eine Möglichkeit zur Abschätzung der Sauerstoffzufuhr ist gegeben, wenn man aus Gleichung (6) mit Hilfe von Gleichung (8) den Belüftungskoeffizient  $k'$  eliminiert und  $c_S'$  für die Versuchstemperatur aus der Sättigungstabelle für Reinwasser- versuche entnimmt. Die Sauerstoffzufuhr berechnet sich dann zu

$$OC = OV_R \cdot \frac{c_S' - c_S^*}{c_S - c_S^*} \quad \text{Glg. (9)}$$

### 1.2.2 Praxis von Betriebsmessungen nach KAYSER

Hauptproblem bei Versuchen unter Betriebsbedingungen sind **Atmungsschwankungen**. Praktisch unmöglich ist es die Atmung bei Durchlaufversuchen konstant zu halten. Aber auch bei Versuchen mit abgestelltem Zulauf und unterbundener Rücklaufschlammzufuhr treten Änderungen der Sauerstoffzehrung auf. Bei Absorptionsversuchen verursacht eine sinkende Atmung zu kleine  $k_{La}$ -Werte wohingegen steigende Atmungswerte zu große  $k_{La}$ -Werte verursachen. Dieser Sachverhalt kehrt sich bei Desorptionsversuchen um.

Die Durchführbarkeit von Versuchen bei abgestellter Abwasser und Rücklaufschlammzufuhr ist wesentlich von der Anlagenkonzeption abhängig. Es ist das anfallende Abwasser und der Rücklaufschlamm in andere Belebungsbecken umzuleiten oder das Abwasser zu speichern, hier sind in der Praxis Grenzen gesetzt.

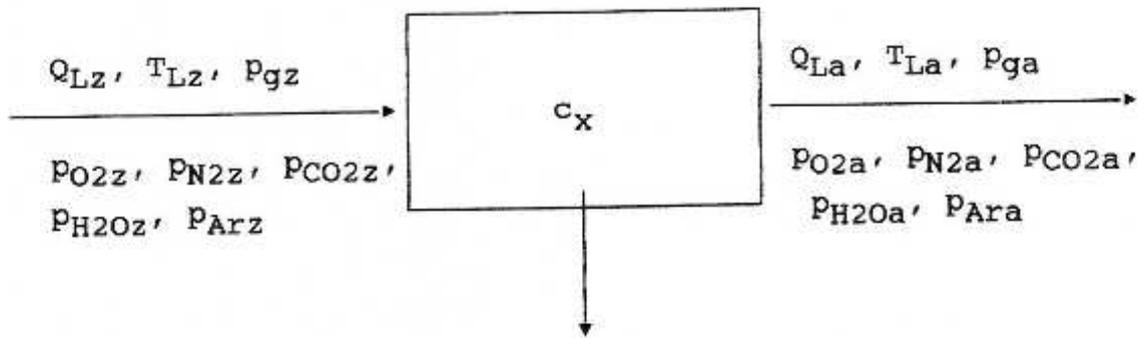
Falls man sich im Einzelfall doch zur Durchführung von Versuchen im Durchlaufbetrieb entschließt ist darauf zu achten, daß es zu keiner Akkumulation von speziellen Abwasserinhaltsstoffen kommt die zu Versuchbeginn große Atmungsänderungen bedingen. Abhilfe kann durch intensive Mischung in der Zehrungsphase und Beginn des Versuches noch vor Eintreten einer Sauerstofflimitierung der Mikroorganismen geschaffen werden.

Die eigentliche Versuchsdurchführung wird durch das Absetzen des Belebtschlammes bei Abstellen der Belüftungseinrichtung beeinträchtigt. Um eine gleichmäßige Atmungsverteilung im Becken zu erreichen ist es oft erforderlich das Belüftungssystem während der Zehrungsphase kurzfristig in Betrieb zu nehmen. Dies ist bei geringen Atmungen und hohen Belüfterleistungen, bzw. bei Belüftungssystemen die ein Abstellen der Luft nicht gestatten, sehr zeitaufwendig und manchmal gar nicht praktikabel. Außerdem ist bei Umlaufbecken und bei Systemen mit geringer Mischwirkung auf Anfahreffekte und Probleme mit der Strömungsbildung zu achten. Für die Zugabe und Einmischung des Wasserstoffperoxides bei Desorptionsversuchen ist prinzipiell die gleiche Sorgfalt anzuwenden wie für das Natriumsulfit bei Reinwassermessungen. In Reinigungsanlagen ohne Vorklärung ist es ein Problem die Sonden frei von Verzopfungen zu halten.

### 1.3 Bestimmung der Sauerstoffzufuhr über eine Gasbilanz

Auch dieses Verfahren ist bereits aus der Literatur bekannt (REDMON, BOYLE, EWING 1983). Es soll an dieser Stelle trotzdem der Versuch unternommen werden die Vorgangsweise mit eigenen Worten darzustellen.

Die Basis der Methode bildet eine Gasbilanz über das Belebungsbecken. Luftmengen auf Normbedingungen (0°C; 1013 hPa) bezogen. Es wird vorausgesetzt, daß das System im Gleichgewicht ist.



## Biologische Aktivitäten

- Sauerstoffzehrung
- Biomasseproduktion

## Physikalische Vorgänge

- Lösung  $\text{CO}_2$
- Lösung  $\text{O}_2$
- Wasserdampfsättigung

$Q_L$	( $\text{Nm}^3/\text{h}$ )	.....	Luftdurchsatz
$T_L$	(K)	.....	Lufttemperatur
$p_g$	(Pa)	.....	Luftdruck gesamt
$p_{\text{O}_2}$	(Pa, Vol%)	.....	Konzentration Sauerstoff
$p_{\text{N}_2}$	(Pa, Vol%)	.....	Konzentration Stickstoff
$p_{\text{CO}_2}$	(Pa, Vol%)	.....	Konzentration Kohlendioxid
$p_{\text{H}_2\text{O}}$	(Pa, Vol%)	.....	Konzentration Wasserdampf
$p_{\text{Ar}}$	(Pa, Vol%)	.....	Konzentration Argon
Indizes: z	.....	zugeführt	
a	.....	abgeführt	

Echte Meßwerte des Versuches sind

- die Luftmenge, zu- oder ab
- die Temperatur, zu- und ab
- der Gesamtdruck, zu und ab
- die Luftfeuchte zu
- der Sauerstoffgehalt ab
- der Kohlendioxidgehalt ab

Zum Umrechnen auf Standardbedingungen  $10^\circ\text{C}$ , 1013 hPa wird zusätzlich der Sauerstoffgehalt im Belebungsbecken und die Wassertemperatur bestimmt. Prinzipiell besteht auch die Mög-

lichkeit beide, den Zuluft- und Abluftstrom, zu messen und so die Bestimmung der Kohlendioxidkonzentration am Austritt einzusparen.

Annahmen bzw. Voraussetzungen:

- Luftfeuchte ab messen oder Luft vor der Messung trocknen
- Partialdrücke bzw. Volumenanteile der Komponenten in der Ansaugluft
- keine simultane Denitrifikation

Je nach Vorliegen der Meßdaten kann mit feuchter oder trockener Luft gerechnet werden, es wird empfohlen mit getrockneten Luftströmen zu arbeiten. Aus den Bilanzen für die einzelnen Komponenten und dem Dalton'schen Gesetz läßt sich die Sauerstoffzufuhr errechnen. Diese ist mit geeigneten Ansätzen auf Standardbedingungen umzurechnen.

### 1.3.1 Inertgasbilanz (Stickstoff und Argon)

Wenn keine oder nur geringfügige Denitrifikation auftritt, errechnet man aus der Bilanz für den Stickstoff und das Argon die Abluftmenge

$$Q_{LA} = Q_{Lz} * (p_{N2z} + p_{Arz}) / (p_{N2a} + p_{Ara})$$

den Partialdruck der Inertgase am Austritt erhält man aus dem Dalton'schen Gesetz zu

$$p_{N2a} + p_{Ara} = p_{ga} - p_{O2a} - p_{CO2a} - p_{H2Oa}$$

### 1.3.2 Sauerstoffbilanz

Aus der Sauerstoffbilanz errechnet man die Sauerstoffzufuhr unter Versuchsbedingungen bei eingestelltem Gleichgewicht zu

$$k_L a' (c_s' - c_s^*) = Q_{Lz} * p_{O2z} - Q_{La} * p_{O2a}$$

### 1.3.3 Praxis der Abluftmessung

Das Sammeln der Luftproben erfordert, bei nicht vollständig abgedeckten Becken, in der Regel einigen konstruktiven Aufwand. Geringe Luftmengen, wie sie zum Beispiel bei Systemen mit hoher Sauerstoffausnutzung auftreten, bereiten bei kontinuierlichen Meßverfahren häufig Probleme. Generell kann nur empfohlen werden die Luft gezielt aus der Sammelvorrichtung für die Analyse abzusaugen.

Um bei offenen Becken eine Aussage über die Sauerstoffzufuhr im gesamten Belebungsbecken machen zu können, ist an mehreren Stellen zu messen, dh. die Sammelvorrichtung zu versetzen. Selbst mit großem Aufwand werden immer nur wenige Prozent der Beckenoberfläche gemessen, wobei auch zu bedenken ist, daß Turbulenzballen im Wasserkörper wandern und dadurch die Reproduzierbarkeit beeinträchtigen. Bei abgedeckten Anlagen ist auf gute Durchmischung im Luftkörper und Vermeidung von Fremdlufteintritt zu achten.

Die Erfassung der Sauerstoffzufuhr in vollständig abgedeckten Becken über die Gasbilanz hat den Vorteil, daß sie eine "integrale" Messung ist, d.h. mit ihr können Beckenkonfigurationen bei denen keine Klarheit über den Mischungszustand besteht gemessen werden.

Versuche im Durchlaufbetrieb sind möglich (vorausgesetzt die Anlage ist im Gleichgewicht). Die sogenannten Anfahrprobleme sind, da die Belüftung durchlaufen kann, nicht vorhanden.

Als nachteilig sind folgende Punkte anzuführen:

- eine Vielzahl an verschiedenen Maßparametern ist zu erfassen. Insbesondere die Sauerstoff- und Kohlendioxidanalyse im Abluftstrom ist aufwendig.
- Die Anwendbarkeit ist auf abgedeckte Becken eingeschränkt bzw. sind Maßnahmen zur Luftprobenahme mittels Hauben von der freien Oberfläche erforderlich.
- Die Genauigkeit der Luftmengenmessung ist von entscheiden-

der Bedeutung; bei der Messung des Zu- und Abluftstromes hat man Differenzen großer Zahlen.

- Eine Sauerstoffgehaltmessung im Belebungsbecken ist auch hier für die Umrechnung der Sauerstoffzufuhr auf  $0 \text{ mgO}_2/\text{l}$  notwendig. In diesem Parameter steckt die größte Unsicherheit des Verfahrens. In der Meßpraxis wird häufig versucht möglichst  $c_x \ll c_s$  einzustellen (z.B. im Durchlaufbetrieb bei hoher Raumbelastung) damit der Korrekturfaktor näherungsweise 1 wird. Diese Vorgangsweise erscheint mit dem Wissen um die Probleme bei der Abwasserreinigung bei Sauerstofflimitierung nicht zulässig. Lediglich wenige Sonderfälle, z.B. Belüftungseinrichtungen in Selektoren und Höchstlastanlagen, gestatten die Ermittlung der Belüfterleistung bei  $0 \text{ mgO}_2/\text{l}$  im Belebungsbecken.

Aus einer Fehlerbetrachtung (FREY 1988) ergibt sich, daß die Luftfeuchtigkeit der angesaugten Luft von untergeordneter Bedeutung ist und bei Vernachlässigung der Kohlendioxidkonzentration (bei üblichen Raumbelastungen) in der Abluft eine um ca. 5% zu große Sauerstoffzufuhr ermittelt wird.

#### 1.4 Tracermessungen

Über die Verwendung von Tracern zur Ermittlung der Sauerstoffzufuhr in Reinwasser und unter Betriebsbedingungen wurde schon 1979 von NEAL berichtet. Die Methode beruht auf der gleichzeitigen Zugabe eines flüssigen Tracers zur Kontrolle der Einmischung in das Becken und eines gasförmigen zur Messung des Stofftransportes aus der Gasphase. Zur praktischen Durchführung wird gasförmiges Krypton 85 vollständig in mit Tritium markiertem Wasser gelöst und dem Belebungsbecken zugegeben. Aus der Änderung der Konzentration des Tritiums in Relation zur Abnahme des Kryptions errechnet man den Stoffübergangskoeffizient für Krypton 85. Aus Untersuchungen ist der Zusammenhang zwischen den Stofftauskoeffizienten für Krypton 85 und Sauerstoff bekannt, womit nun die Sauerstoff-

zufuhr berechnet werden kann.

Aus den verschiedensten Gründen, wie zum Beispiel der Umgang mit radioaktiven Stoffen, den in der Abwassertechnik nicht verfügbaren Meßgeräten, den Kosten, usw., hat diese Methode auf dem Gebiet der Abwasserreinigung keine weite Verbreitung gefunden.

Nach umfangreichen Vergleichen kommen MÜLLER und BOYLE 1988 zu dem Ergebnis, daß die Tracermethode zur Zeit das genaueste Verfahren, aber relativ teuer und auf spezielle Anwendungsfälle eingeschränkt ist.

## 2. REGELUNG DER SAUERSTOFFZUFUHR

Grundvoraussetzung für die Abwasserreinigung mit dem Belebungsverfahren ist eine ausreichende Sauerstoffversorgung des belebten Schlammes. Zuzufolge der steigenden Anforderungen an die Ablaufqualität ist es erforderlich, die Anlagenkonzeption immer weiter zu verbessern. Dies bedingt auch immer größer werdende Anforderungen an das Belüftungssystem im Hinblick auf dessen Regelbarkeit und Wirtschaftlichkeit. Da bis zu 60% des gesamten Energiebedarfes einer biologischen Kläranlage für die Sauerstoffzufuhr verbraucht wird, ist es schon aus wirtschaftlicher Sicht unbedingt erforderlich, daß die Sauerstoffzufuhr dem Bedarf angepaßt wird. Die zum Teil erheblich schwankende Schmutzfracht erfordert einen weiten Regelbereich der Sauerstoffzufuhr.

Primär kann der Energieaufwand durch die Wahl eines Belüftungssystems mit hoher Effizienz erheblich reduziert werden. Darüber hinaus spielt die Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken eine erhebliche Rolle, da der Stofftransport wesentlich von der sogenannten "treibenden Konzentrationsdifferenz" abhängt. Die erforderlichen Sauerstoffgehalte im Be-

lebungsbecken werden wesentlich von der vorgesehenen Schlamm-  
belastung bestimmt. Bei Anlagen mit hoher Schlammbelastung  
sind große Frachtspitzen und dadurch starke Schwankungen im  
Sauerstoffbedarf zu erwarten. Um im gesamten Becken eine Min-  
destsauerstoffkonzentration von  $0,5 \text{ g/m}^3$  zu gewährleisten ist  
ein höherer Sauerstoffgehalt, z.B.  $1,0-2,0 \text{ g/m}^3$  (Arbeitsbe-  
richt FA 2.13) zu wählen, als bei geringer belasteten Anla-  
gen. Es sollte keinesfalls mit unnötig hohen Sauerstoffgehal-  
ten im Belebungsbecken gefahren werden, da sich dies in einem  
erhöhten Energieverbrauch bemerkbar macht.

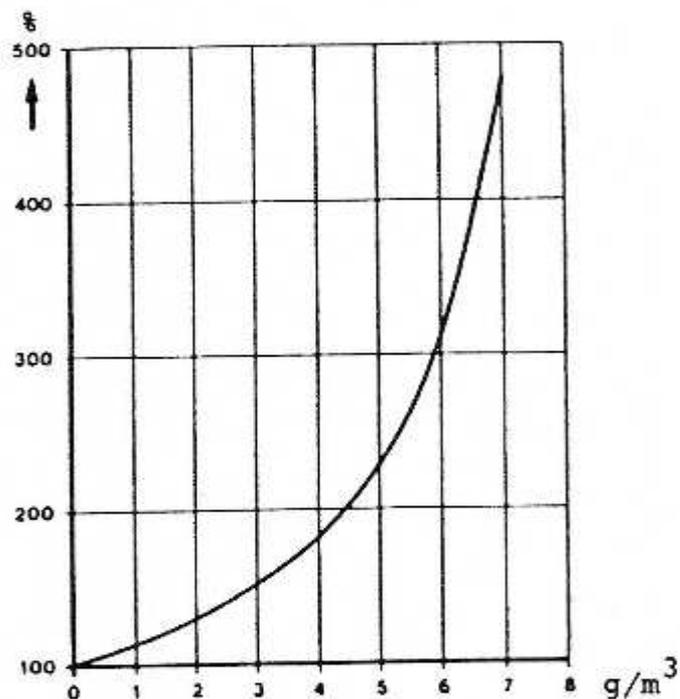


Abb.2: Energiemehrbedarf verschiedener Sauerstoff-  
betriebskonzentrationen  $c_x$  gegenüber  $c_x = 0$

Bei der Regelung des Sauerstoffgehaltes ist die Wahl der  
richtigen Meßstelle von entscheidender Bedeutung. Dabei  
spielt der Reaktortyp, ideal durchmischer Reaktor, Kaskade,  
oder Rohrreaktor eine besondere Rolle. Bei vollständig durch-  
mischten Becken ist es theoretisch gleichgültig, an welcher  
Stelle gemessen wird. Es ist lediglich zu beachten, daß bei  
Oberflächenbelüftungen nicht direkt an der Oberfläche gemes-

sen (da hier höhere Sauerstoffkonzentrationen auftreten) und bei Druckbelüftung die Sauerstoffmessung nicht durch aufsteigende Luftblasen beeinträchtigt wird. Bei Kaskaden liegt der günstigste Meßpunkt für eine Regelung etwa im zweiten Drittel des Beckens. Regeltechnisch am ungünstigsten sind längsdurchströmte Becken. Hier ist die Zehrung in den einzelnen Beckenabschnitten sehr unterschiedlich und es wird im Einzelfall die Anordnung der Meßsonde zu bestimmen sein.

### 2.1 Regelbereich und Zufuhrcharakteristik

Der Regelbereich des Belüftungssystems richtet sich nach der Sauerstoffverbrauchsschwankung, die auf der Kläranlage zu erwarten ist. Auf kommunalen Kläranlagen mittlerer Größe sollte die Sauerstoffzufuhr in einem Bereich von ca. 5:1 regelbar sein. Dieser Bereich ist für Kläranlagen, die bei Auslegungsbelastung arbeiten, ausreichend. In manchen Fällen werden jedoch Abwasserreinigungsanlagen wesentlich unter ihrer Nennbelastung betrieben. Je nach Anlagenkonzeption (mehrere Becken) wird das Belüftungssystem bei Teillast betrieben und arbeitet, mehr oder weniger, unwirtschaftlich. Nicht vergessen werden darf, daß durch Reduktion der Sauerstoffzufuhr die Mischung des Belebtschlammes, d.h. die Aufgabe Ablagerungen zu vermeiden, erfüllt werden kann. Durch Trennen von Belüftung und Umwälzung wird in vielen Fällen eine größere Flexibilität der Sauerstoffzufuhr und ein energie günstigerer Betrieb erreicht. Die verschiedenen Belüftungseinrichtungen weisen ein mehr oder weniger ausgeprägtes Betriebsoptimum auf.

Um einen wirtschaftlichen Betrieb im gesamten Arbeitsbereich zu ermöglichen, sind Belüfter mit flachem Verlauf der Ertragskurve bei gleichzeitig hohem Niveau von Vorteil. Das kritische Prüfen der möglichen Betriebszustände auch außerhalb des eigentlichen Auslegungspunktes im Teillast- und Überlastbereich sollte Bestandteil jeder Planung sein.

spez. Sauerstofftrag  
kg/kWh

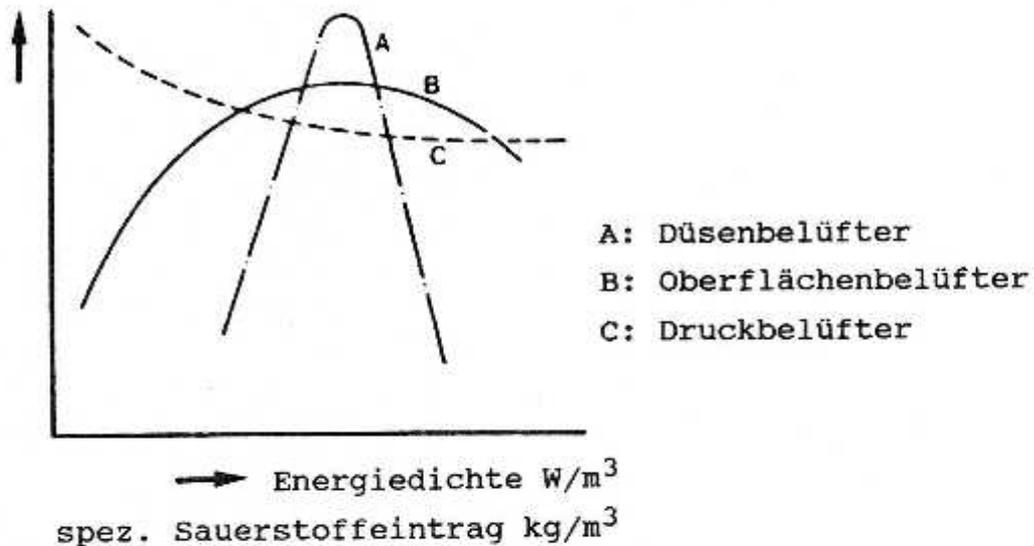


Abb.3: Sauerstoffeintrag verschiedener Belüftungssysteme im Abhängigkeit der Energiedichte

## 2.2 Eingriffsmöglichkeiten

In Anlagen mit Oberflächenbelüftern wird die Änderung der Sauerstoffzufuhr über die Veränderung der Antriebsleistung erreicht. Dies erfolgt durch

- die Anzahl der in Betrieb genommenen Maschinen
- Veränderung der Eintauchtiefe
- Veränderung der Drehzahl

Die Drehzahländerung wird im allgemeinen durch polumschaltbare Motore erreicht. Dies bedeutet aber, daß man sich auf zwei, maximal auf drei Stufen zu beschränken hat. Ein stufenloser Regelbereich kann über einen Frequenzumformer herbeigeführt werden. Wichtig ist, daß Einflüsse der Regelung auf die Anlagenhydraulik und damit auch auf den Absetzvorgang in der Nachklärung so gering wie möglich gehalten werden.

In Anlagen mit Druckbelüftung wird die Sauerstoffzufuhr

durch die Änderung des Luftdurchsatzes beeinflusst. Dies kann durch das Zu- und Abschalten von Maschinensätzen, Drehzahländerung oder Veränderung der Diffusorstellung erreicht werden. Die Änderung des Luftmassenstromes durch Diffusorverstellung wird bei Strömungsverdichtern ausgeführt. Bei diesem Gebläsetyp ist die Pumpgrenze unbedingt zu berücksichtigen. Aus diesem Grund werden häufig die Verdrängungsverdichter, wie z.B. Drehkolbengebläse oder Schraubverdichter, den Strömungsverdichtern (Turbogebbläse) vorgezogen. Der Einsatz einer Drehzahlregelung ist bei einer Druckbelüftung zumeist preiswerter durchzuführen als bei Oberflächenbelüftern, da bei Verwendung mehrerer Maschinen nur ein Gebläse mit einer Verstellmöglichkeit ausgerüstet werden muß. Schon in der Projektierungsphase ist auf die Regelbarkeit und Regelbereiche verschiedener Belüftungssysteme und den damit verbundenen Kosten Rücksicht zu nehmen. Der Wert einer Sauerstoffzufuhrregelung bzw. Steuerung darf jedoch nicht ausschließlich aus der Sicht möglicher Betriebskosteneinsparung gesehen werden. Die Verbesserung der Betriebszuverlässigkeit und die Einhaltung und Steigerung der Ablaufqualität ist vorrangig.

### 2.3 Regelstrategien

Die zunehmende Forderung nach Nitrifikation (Oxidation des Ammoniums zu Nitrat) erfordert aus betrieblichen Gründen (Rückgewinn an Pufferkapazität, Reduktion von Schwimmschlamm auf der Nachklärung und Energieeinsparung) auch die weitgehende Denitrifikation (Entfernung des Nitrates). Dieses Ziel, die Stickstoffelimination, kann mit verschiedenen Verfahrenskonzepten auf die im Rahmen dieses Kurses schon eingegangen wurde erreicht werden. Allen Verfahrensweisen ist gemeinsam, daß entweder räumlich oder zeitlich versetzt Zonen mit und ohne freien Sauerstoff geschaffen werden. Um eine hohe Reinigungsleistung und einen wirtschaftlichen Betrieb der Abwasserreinigungsanlage zu erreichen ist daher eine Regelung der

Sauerstoffzufuhr erforderlich.

Als Regelparameter können der Sauerstoffgehalt, der Sauerstoffverbrauch, die Trübung, das Redox-Potential sowie Ammonium- und Nitratgehalt verwendet werden.

Die heute angewendeten Regelstrategien stellen sich wie folgt dar:

- **Programmsteuerung** mittels einfacher Zeitschaltuhren, programmierbaren Steuerungen oder Computern. In der Regel für kleinere Anlagen mit weitgehend konstanten Zuflußverhältnissen geeignet. Das Programm der Steuerung wird nach Betriebsmessungen (z.B. Sauerstoffgehaltsaufzeichnungen, Nitrat- und Ammoniumgehaltsmessungen) angepaßt. Die Programmsteuerung ist sowohl für den BSB<sub>5</sub>-Abbau als auch für die simultane Denitrifikation einsetzbar.
- Regelung nach dem **Sauerstoffgehalt**. Problematisch in längs durchflossenen Druckluftbecken und bei Kreisel in Kaskadenschaltung. In Umlaufbecken meist nicht sinnvoll. Diese Regelstrategie wird meist in Form einer Zweipunktregelung ausgeführt. Eine Verbesserung der Ablaufwerte ist z.B. bei der intermittierenden Denitrifikation durch Berücksichtigung der Sauerstoffzehrung möglich.
- Regelung nach dem **Sauerstoffverbrauch**. Diese ist für den BSB<sub>5</sub>-Abbau als auch für simultane Denitrifikation anwendbar.
- Regelung mit dem Schreiber-O<sub>2</sub>-Minimator. Das Meßprinzip basiert auf einer **Trübungsmessung** des gereinigten Ablaufes. Es ist nach vorliegenden Erfahrungen für den BSB<sub>5</sub>-Abbau und simultane Denitrifikation einsetzbar.
- Die Regelung nach dem **Redox-Potential** in der Belebung ist für Nitrifikation und Denitrifikation einsetzbar.
- Eine Regelung nach dem **Ammonium-** oder **Nitratgehalt**. Ist nur für Anlagen, die nitrifizieren anwendbar.

### 2.3.1 Regelung nach dem Sauerstoffverbrauch

Die Regelung der Belüftung nach dem Sauerstoffverbrauch wurde von v.d.EMDE eingeführt und zur Steuerung der Belüftung der Kläranlage Wien-Blumental eingesetzt (USRAEL 1977). Hierbei wird ein Simulationsgefäß konstant grobblasig belüftet. Aus dem Belebungsbecken wird kontinuierlich Belebtschlamm-Abwassergemisch in ein Dosierbecken und von hier mit einem Schöpfrad in das Simulationsbecken gefördert. Aus der bekannten Sauerstoffzufuhrleistung in der Simulation und dem Sauerstoffgehalt im Simulationsbecken ist eine Bestimmung des aktuellen Sauerstoffverbrauches und damit eine Anpassung des Belüftungssystems möglich. Einen möglichen Aufbau solch einer kontinuierlichen Sauerstoffverbrauchsmessung ist in Abbildung 4 dargestellt.

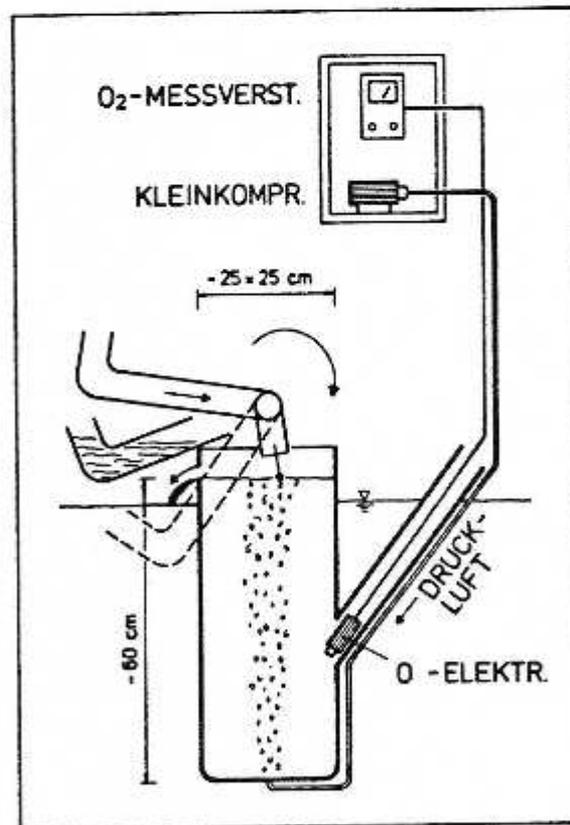


Abb.4: Kontinuierliche Sauerstoffverbrauchsmessung (KAYSER 1983)

### 2.3.2 Regelung mit dem Schreiber O<sub>2</sub>-Minimator

Das Prinzip des Schreiber O<sub>2</sub>-Minimators ist eine Trübungsmessung im Ablauf eines definiert beschickten Absetzbeckens.

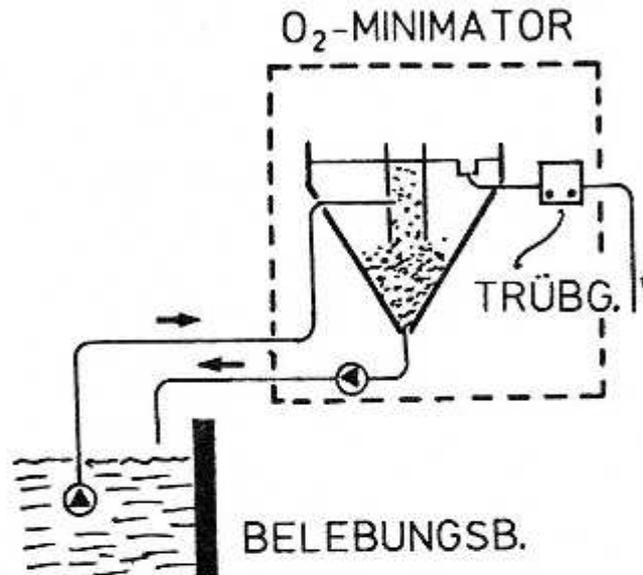


Abb.5: Schreiber O<sub>2</sub>-Minimator

Nach dem Absinken des Nitratgehaltes auf Null kommt es offenbar zu einem leichten Flockenzerfall, wodurch die Trübung ansteigt. Die Belüftung wird so geregelt, daß die Trübung in einem relativ schmalen Bereich gehalten wird.

### 2.3.3 Regelung nach dem Redox-Potential

In Untersuchungen an der TU-Braunschweig schwankte das Redox-Potential zwischen -130 und +20 mV während der NO<sub>3</sub>-N Gehalt zwischen 2,5 und 6,0 mg/l pendelte. Durch setzen von Grenzwerten könnte eine Regelung realisiert werden.

Bemerkenswert ist, daß bei Abfall des Nitratgehaltes auf Null das Redox-Potential sehr stark abfällt (Abbildung 6). Der untere Knickpunkt in der Redox-Kurve signalisiert also Nitratgehalt Null. Hierauf laßt sich eine Regelstrategie aufbauen: Die Redox-Kurve wird mittels Rechner zwecks Erken-

nung des unteren Knickpunktes laufend ausgewertet. Die Belüftung wird nun für eine, auf die örtlichen Verhältnissen abgestimmte, Zeitspanne intensiviert.

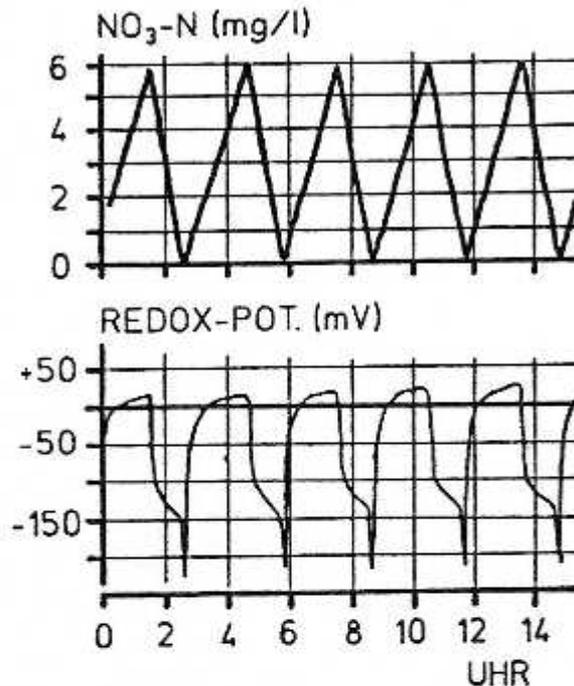


Abb.6: Verlauf des Nitratgehaltes und des Redox-Potentials bei intermittierender Belüftung (KAYSER 1989)

#### 2.3.4 Regelung nach dem Ammonium- oder Nitratgehalt

Aus dem Belebungsbecken wird kontinuierlich eine Probe gezogen, die über einen Ultrafilter geleitet wird. Der schwebstofffreie Probenstrom wird einem Nitrat- oder Ammoniumanalysator zugeführt. Über einen Regler kann dann die Belüftung ein- oder ausgeschaltet bzw. variiert werden. Wählt man als Regelgröße den Ammoniumgehalt, so werden bei einem vorgegebenen unteren Grenzwert Belüfter ab- und beim oberen Grenzwert zugeschaltet. Arbeitet man mit einem Nitratanalysator, so wird am unteren Grenzwert die Belüftung intensiviert und am oberen reduziert.

Das Grundscheema wurde von ERMEL 1983 entwickelt und ist in Abbildung 7 dargestellt.

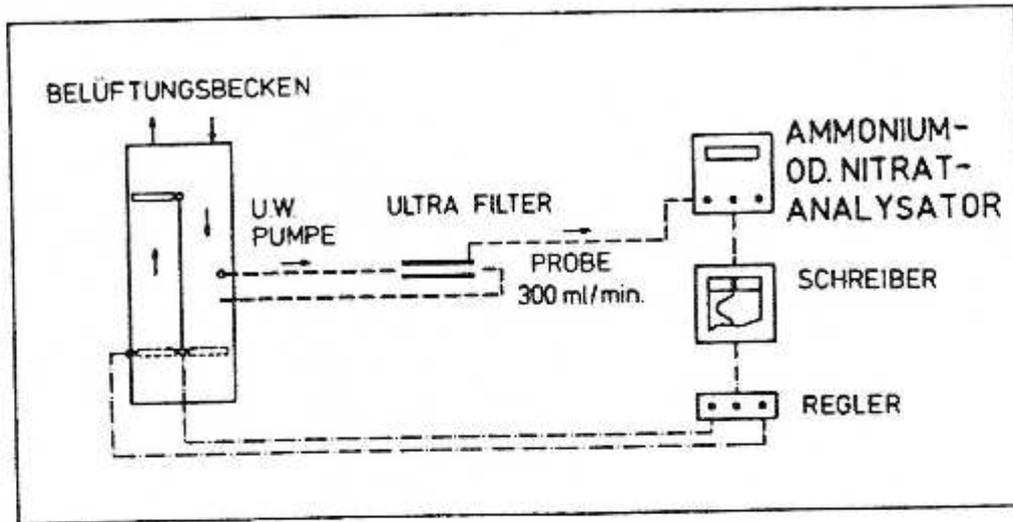


Abb.7: Regelung nach dem Nitrat- oder Ammoniumgehalt

Wenn das Belebungsbecken ausreichende Größe hat, und das  $BSB_5:N$  Verhältnis groß genug ist, ist es gleichgültig, welchen Parameter man für die Regelung verwendet. Es werden sich stets zugleich geringe Ammonium- und Nitratgehalte im Ablauf einstellen. Ist das Belebungsbecken nur so groß, daß man zwar entweder vollständige Nitrifikation und teilweise Denitrifikation oder umgekehrt erreichen kann, so hängt es von den Forderungen aus der Sicht des Gewässerschutzes ab, welchen Parameter man zu wählen hat. Werden stets geringe Ammoniumgehalte gefordert, so ist nur eine Regelung nach der Ammoniumkonzentration sinnvoll. Der Nitratgehalt im Ablauf der Anlage wird einen Tages-, Wochen- und Jahresgang aufweisen. Bei hohen Temperaturen wird weniger Volumen für die Nitrifikation benötigt, die Denitrifikation ist daher im Sommer weitgehender als im Winter. Der Tages- und Wochengang resultiert aus den Schwankungen der Stickstofffrachten des Zulaufs und der Schwankung des  $BSB_5:N$ -Verhältnisses.

### 3. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Zur Durchführung von Reinwassermessungen existieren verschiedene Arbeitsvorschriften. Diese stimmen nicht in allen Punkten überein, es ist eine Vereinheitlichung des Bezugsdruckes und der Bezugstemperatur anzustreben. Bei dieser Gelegenheit sollte auch eine erweiterte Empfehlung über die Sondenordnung und Computerauswertung in die österreichische Arbeitsanleitung aufgenommen werden.

Für den Betrieb einer Abwasserreinigungsanlage ist die Sauerstoffzufuhrleistung unter Betriebsbedingungen entscheidend. Alle Verfahren mit denen die Sauerstoffzufuhr unter Betriebsbedingungen ermittelt werden kann, stoßen irgendwo auf die Grenzen ihrer Anwendbarkeit. Es ist empfehlenswert, mehrere Methoden gleichzeitig anzuwenden, um Störungen zu erkennen und die Weiterentwicklung voranzutreiben. In jedem Fall ist bei Garantiemessungen unter Betriebsbedingungen die Zustimmung aller Beteiligten zur eingesetzten Meßmethode einzuholen.

Die Realisierung der stetig steigenden Anforderung an die Reinigungsleistung unter Einhaltung stabiler Betriebsverhältnisse und geringstmöglicher Kosten erfordert den vermehrten Einsatz komplexer Regelstrategien für die Belüftung.

In jedem Fall ist eine optimale Abstimmung der einzelnen Systemkomponenten, wie Beckengeometrie und Belüftungssystem erforderlich. Das Belüftungssystem sollte über einen großen Bereich der Sauerstoffzufuhr mit nahezu gleichbleibender Wirtschaftlichkeit zu betreiben sein. Hierfür ist eine gute Abstufung der Belüfterleistung erforderlich.

4. LITERATUR

- : Sauerstoffkonzentrationsmessung, Regelung und Steuerung der Sauerstoffzufuhr, 2. Arbeitsbericht des Fachausschusses 2.13 "Automatisierung von Kläranlagen", Korrespondenz Abwasser 26, H.2 (1979), 78-102
- ASCE: A Standard for the Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water, Published by the American Society of Civil Engineers, July 1984
- ERMEL G.: Stickstoffentfernung in einstufigen Belebungsanlagen - Steuerung der Denitrifikation, Veröffentlichung des Institutes für Stadtbauwesen, TU Braunschweig, Heft 35, 1983
- FREY W.: Bestimmung der Sauerstoffzufuhr mittels Gasbilanz, Workshop 15. und 16. März 1988, Schriftenreihe WAR 36, Darmstadt, 1988
- HIXON A.W. und GADEN, E.L.: Oxygen Transfer in Submerged Fermentation. Ind. and Eng. Chem. 42 (1950), 1792 - 1801
- KAYSER R.: Ermittlung der Sauerstoffzufuhr von Abwasserbelüftern unter Betriebsbedingungen. Veröffentlichung des Institutes für Stadtbauwesen, Technische Hochschule Braunschweig (1967)
- KAYSER R.: Zur Frage der Überprüfung des Sauerstoffeintrages, 12.ÖWWV Seminar (1977), Wiener Mitteilungen, Band 22
- KAYSER R.: Wirtschaftlichkeit verschiedener Belüftungssysteme unter Betriebsbedingungen, 17. ÖWWV Seminar (1982), Wiener Mitteilungen, Band 47
- KAYSER R.: Möglichkeiten und Grenzen der Walzenbelüftung im Umlaufbecken, Berichte der ATV Nr.35 (1983), 693-705
- KAYSER R.: Möglichkeiten und Grenzen der Bestimmung der Sauerstoffzufuhr in Reinwasser und unter Betriebsbedingungen, Wiener Mitteilungen, Band 64, (1986), 1-28

- KAYSER E.: Möglichkeiten und Grenzen der Flexibilisierung von Kläranlagen durch Prozeßregelung, Veröffentlichung des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft, TU Braunschweig, Heft 47 (1989)
- MUELLER J.A., BOYLE W.C.: Oxygen transfer under process conditions, J. Water Pollut. Control Fed., 60, (1988), 332-341
- NEAL L.A.: Use of Tracers for Evaluation Oxygen Transfer, EPA-600/9-78-021, U.S.EPA, (1979)
- REDMON D., BOYLE W.C., EWING L.: Oxygen transfer efficiency measurements in mixed liquor using off-gas techniques, J. Water Pollut. Control Fed., 55, (1983), 1338-1347
- USRAEL G.: Control of aeration at the Treatmentplant Vienna-Blumental, Progress Wat. Techn. 8, No.6, (1977), 245-249

FREY Wilhelm, Dipl.Ing.

Institut für Wassergüte und Landschaftswasserbau

Technische Universität Wien

Karlsplatz 13

A-1040 Wien