

**WIENER MITTEILUNGEN**

**WASSER · ABWASSER · GEWÄSSER**

**BELÜFTUNGSSYSTEME BEIM  
BELEBUNGSVERFAHREN**

**BAND 64 – WIEN**

# **WIENER MITTEILUNGEN**

## **WASSER · ABWASSER · GEWÄSSER**

**BAND 64**

### **BELÜFTUNGSSYSTEME BEIM BELEBUNGSVERFAHREN**

**FORTBILDUNGSKURS DES ÖWWV  
WIEN, 30.1.1986**

**HERAUSGEBER :**  
**PROF. DDR.-ING. W.v.d.EMDE**  
**INSTITUT FÜR WASSERGÜTE UND**  
**LANDSCHAFTSWASSERBAU**  
**TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN**



KORREKTUREN:

Seite	Zeile von	sollte stehen
12	3 v.ob.	...auch die spezifische Einblasenergie...
143	5 v.ob.	...Versuchstemperatur (korrigiert mit Einblastiefe).
149	5 v.unt.	$OC'_{L-ET} = \frac{300 \cdot 100 - 84 \cdot 14}{7,2 \cdot 100 \cdot 14 - 2} = 7,8 \text{ g/Nm}^3 \cdot \text{m}$
	3 v.unt.	$OC' = 46 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$
	2 v.unt.	...Wert zu 0,78.
150	im Diagramm	$\alpha = \frac{46}{59} = 0,78$

# INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Rolf KAYSER Möglichkeiten und Grenzen der Bestimmung der Sauerstoffzufuhr in Reinwasser und unter Betriebsbedingungen	1
Gero FRÖSE Ergebnisse von Sauerstoffeintragungsmessungen in Reinwasser und unter Betriebsbedingungen	29
Jan KORAL Ergebnisse von Sauerstoffzufuhrversuchen mit verschiedenen Belüftungssystemen	45
Hans BURKHALTER Ergebnisse von Sauerstoffzufuhrversuchen in Althenrein (Schweiz)	69
Sigurd SCHLEGEL Ergebnisse von Sauerstoffzufuhrversuchen mit verschiedenen Belüftungssystemen	85
Ewald MAYR Ergebnisse von Sauerstoffzufuhrversuchen mit verschiedenen Belüftungssystemen	105
Wilhelm FREY Ergebnisse von Sauerstoffzufuhrversuchen mit verschiedenen Belüftungssystemen	141
Rolf KAYSER Regelung der Belüftung	155
Sigurd SCHLEGEL Regelung der Belüftung	167

## VORTRAGENDE

Dipl.-Ing. ETH H. BURKHALTER, Eidg. Anstalt für Wasserversorgung,  
Abwasserrreinigung und Gewässerschutz, Versuchsstation  
Tüffenwies, CH-8064 Zürich

Dipl.-Ing. W. FREY, Technische Universität Wien,  
A-1040 Wien, Karlsplatz 13

Dipl.-Ing. G. FRÖSE, Technische Universität Braunschweig  
D-3300 Braunschweig, Adolf-Bingel-Straße 2

Prof.Dr.-Ing. R. KAYSER, Technische Universität Braunschweig  
D-3300 Braunschweig, Adolf-Bingel-Straße 2

Dipl.-Ing. J. KORAL, Amt für Gewässerschutz und Wasserbau  
des Kantons Zürich, CH-8090 Zürich

OBR Dipl.-Ing. E. MAYR, Amt der oberösterreichischen Landes-  
regierung, A-4020 Linz, Kärntnerstraße 12

Dr.-Ing. S. SCHLEGEL, Emschergenossenschaft/Lippeverband  
D-4300 Essen 1, Kronprinzenstraße 24

MÖGLICHKEITEN UND GRENZEN DER BESTIMMUNG DER SAUERSTOFF-  
ZUFUHR IN REINWASSER UND UNTER BETRIEBSBEDINGUNGEN

KAYSER R.

1. THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Die Sauerstoffzufuhr ( $OC_R$ ) eines Belüftungssystems ist definiert als die Änderung des Sauerstoffgehaltes beim Sauerstoffgehalt  $c = 0$  bei einer Standardtemperatur von  $10^\circ\text{C}$  oder  $20^\circ\text{C}$ :

$$\frac{dc}{dt} = OC_R = k_L a \cdot c_s \quad (1)$$

Ziel von Sauerstoffzufuhrversuchen ist die Bestimmung des Belüftungskoeffizienten ( $k_L a$ ) und des Sättigungswertes ( $c_s$ ). Da die Sauerstoffzufuhrversuche in aller Regel nicht bei Standardtemperatur durchgeführt werden können, müssen  $k_L a$  und  $c_s$  auf die Standardtemperatur eingerechnet werden. Es gilt

$$k_L a(10) = k_L a(T) \cdot 1,02^{(10-T)} \quad (2)$$

$$c_s(10) = c_s(T) \cdot \frac{c_{ss}(10)}{c_{ss}(T)} \quad (3)$$

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

$$k_L a(\text{Betrieb}) = \alpha \cdot k_L a \quad (4)$$

$$c_s(\text{Betrieb}) = \beta \cdot c_s \quad (5)$$

In einem Belebungsbecken ändert sich der Sauerstoffgehalt nach folgender Gleichung (dabei wurde unterstellt, daß der Sauerstoffgehalt des Rohabwassers und des Rücklaufschlammes Null ist):



$$\frac{dc}{dt} = \alpha \cdot k_L a \cdot (\beta \cdot c_s - c) - OV_R - \frac{Q(1+RS)}{V} \cdot c \quad (6)$$

Für Reinwasserbedingungen ohne Wasserdurchfluß mit  $OV_R = 0$  und  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 1$  wird aus Gl. 6

$$\frac{dc}{dt} = k_L a \cdot (c_s - c) \quad (7)$$

In integrierter Form erhält man die Funktion für die Anstiegskurve des Sauerstoffgehaltes bei Reinwasserversuchen:

$$c = c_s - (c_s - c_0) \cdot e^{-k_L a \cdot t} \quad (8)$$

Hieraus werden  $c_s$  und  $k_L a$  berechnet, worauf später eingegangen wird.

Für Betriebsbedingungen erhält man aus Gl. 6 bei konstantem Sauerstoffgehalt, wir bezeichnen diesen als scheinbaren Sättigungswert ( $c_s^*$ ) eine Bestimmungsgleichung für  $\alpha \cdot k_L a$

$$\alpha \cdot k_L a = \frac{OV_R + \frac{Q(1+RS)}{V}}{(\beta \cdot c_s - c_s^*)} \quad (9)$$

Die Atmung ( $OV_R$ ) und den Sauerstoffgehalt ( $c_s^*$ ) muß man messen, ( $\beta \cdot c_s$ ) muß man annehmen. Kernproblem der Anwendung von Gl. 7 ist, daß es schwierig ist,  $OV_R$  richtig zu messen (KAYSER, 1967). Brauchbare Ergebnisse erhält man am ehesten, wenn man die Abwasserzufuhr abstellt. In diesem Fall wird aber ( $\beta \cdot c_s - c_s^*$ ) klein, weil  $OV_R$  klein wird. Dadurch wird aufgrund von falscher Annahme von  $\beta \cdot c_s$  oder Meßfehlern bei  $c_s^*$  die Fehlerbreite insgesamt auch wieder groß.

Zur Bestimmung der Sauerstoffzufuhr unter Betriebsbedingungen wird daher heute analog wie beim Reinwasserversuch vorgegangen: Der Sauerstoffgehalt wird zum Versuchsbeginn entweder durch Drosselung der Belüftung stark verringert oder durch Zugabe von Wasserstoffperoxyd künstlich erhöht. Die Funktion der Anstiegs- oder Abnahme-

kurve ist identisch mit Gl. 8, nur daß anstelle des Sättigungswertes ( $c_s$ ) der scheinbare Sättigungswert ( $c_s^*$ ) steht, auch  $(\alpha \cdot k_L a)$  wird generell als scheinbarer Wert  $(\alpha \cdot k_L a)^*$  ermittelt (KAYSER, 1977, 1982).

$$c = c_s^* - (c_s^* - c_0) \cdot e^{-(\alpha \cdot k_L a)^* \cdot t} \quad (10)$$

Die Identität von Gl. 8 und Gl. 10 läßt das gleiche Auswerteverfahren zu. Zu beachten ist jedoch, daß der scheinbare Sättigungswert  $c_s^*$  während des Versuches konstant bleiben muß. Beeinflußt wird  $c_s^*$ , wie in Gl. 12 noch gezeigt wird, durch die Atmung  $OV_R$  und ggf. den Abwasserdurchfluß. Beide müssen ebenfalls konstant sein. Eine konstante Atmung erhält man am ehesten, wenn man den Abwasser- und Rücklaufschlammzufluß unterbricht.

Den Belüftungskoeffizienten  $(\alpha \cdot k_L a)$  erhält man wie folgt:

$$\alpha \cdot k_L a = (\alpha \cdot k_L a)^* - \frac{Q(1+RS)}{V} \quad (11)$$

Ohne Abwasser- und Rücklaufschlamm durchfluß ergibt Gl. 10 also unmittelbar den Belüftungskoeffizienten  $(\alpha \cdot k_L a)$ .

Theoretisch kann man aus den Versuchsdaten den Sättigungswert ermitteln (Umstellung von Gl. 9):

$$B \cdot c_s = c_s^* + \frac{OV_R + \frac{Q(1+RS)}{V}}{(\alpha \cdot k_L a)} \quad (12)$$

Man würde dann letztlich die Sauerstoffzufuhr unter Betriebsbedingungen

$$OC_R(\text{Betr}) = (\alpha \cdot k_L a) \cdot (B \cdot c_s) \quad (13)$$

aus dem Versuchsergebnis berechnen können.

In Abb. 1 sind die Zusammenhänge Reinwasser- und Betriebsbedingungen dargestellt.

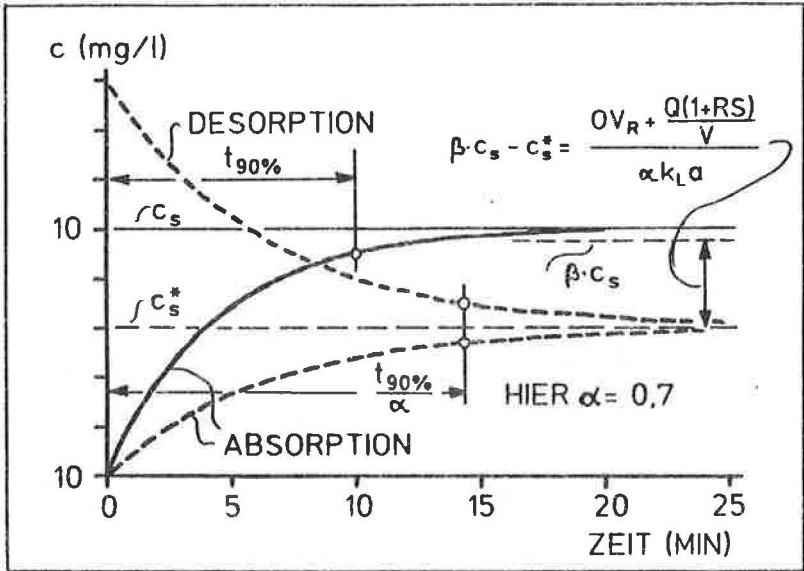


Abb. 1: Belüftungskurven für Reinwasser und Betriebsbedingungen

Es ist anzufügen, daß es nicht möglich ist, den  $\alpha$ -Faktor durch Laborversuche zu ermitteln, um so von Messungen unter Betriebsbedingungen auf das Verhalten in Reinwasser schließen zu können. Der  $\beta$ -Wert ist hauptsächlich vom Salzgehalt abhängig. Bei kommunalem Abwässern kann man mit  $\beta = 1,0$  rechnen.

## 2. STAND DER NORMUNG

Allgemein verbindliche Vorschriften existieren zur Zeit nur für Reinwasserversuche. In Österreich gilt die ÖNORM M 5888, "Sauerstoffzufuhr-Leistung von Belüftungseinrichtungen, Bestimmung in Reinwasser" (A), in der Bundesrepublik Deutschland existiert eine

"Arbeitsanleitung für die Bestimmung der Sauerstoffzufuhr von Belüftungssystemen in Reinwasser" (D) und in den USA hat die American Society of Civil Engineers die Norm "A Standard for the Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water" (USA) herausgegeben. Im Grundsatz sind die drei Vorschriften gleich, auf die wesentlichen Unterschiede wird kurz eingegangen. Dabei werden als Quellenangaben A, D und USA verwendet.

### 2.1 Zur Versuchsdurchführung

Als Reinwasser wird in D ein Wasser, welches der Trinkwassernorm entspricht, definiert. In A soll das Wasser frei von organischen Substanzen, Salzen und Detergentien sein. Auch in USA soll dem Trinkwasser vergleichbares Wasser verwendet werden. Vor dem Test soll dort vom Wasser stets der Abdampfdruckstand bestimmt werden. Bei schlechterer Wasserqualität sollten auch Eisen, Mangan, freies Chlor, Alkalität, pH, TOC oder CSB und Detergentien analysiert werden.

Die Konzentration des Kobaltkatalysators soll in A größer als 1,5 mg/l, in D rd. 0,5 mg/l sein. In den USA wird 0,1 bis 0,5 mg/l gelöstes Kobalt verlangt. Nach der Einmischung und am Ende jeder Testserie soll das Wasser auf gelöstes Kobalt analysiert werden.

Die zuzugebende Menge an Natriumsulfit soll die für die Bindung des gelösten Sauerstoffs notwendige Menge in A um mindestens 20% übersteigen. In D wird (was nicht realistisch ist) verlangt, den Sauerstoffgehalt für mind. 0,5 Stunden oder 6 Umläufe in Umlaufbecken bei Null zu halten. In USA soll die Oberdosierung 20%-250% betragen. An allen Meßpunkten sollte der Sauerstoffgehalt für mindestens zwei Minuten bei null gehalten werden. Mit einer Reinwasserfüllung dürfen in A maximal 6 Versuche durchgeführt werden. D läßt Versuche bis zu einer Gesamtsalzkonzentration von 2,0 g/l (max. Leitfähigkeit von 3000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) zu, dies entspricht einer Gesamtzugabe von rd. 1,7 g  $\text{Na}_2\text{SO}_3/\text{l}$ . USA läßt Versuche bis 1,5 g/l zu, aber wenn der Salzgehalt des Reinwassers schon größer als



0,5 g/l (Abdampfdruckstand) ist, kann der Grenzwert auf 2,0 g/l angehoben werden.

A verlangt mindestens zwei Meßstellen, eine soll vom Schreiber aufgenommen werden. Jeder Versuch soll zweimal durchgeführt werden.

D: Mindestens drei Meßstellen, einer auf Schreiber; jeder Versuch zweimal. USA: Mindestens vier Meßpunkte, mindestens drei Versuche.

Die Sauerstoffelektroden müssen in A nicht geeicht sein. D und USA schreiben Eichung vor. Zur Trägheit nennt A: 90% Änderung in 1 Min.,

D: 90% in 0,5 Min., USA:  $t_{90\% \text{ Elektr.}} = 0,02 \cdot t_{90\% \text{ Becken}}$

Als Versuchsende wird in A und D 99% Sättigung angestrebt. D sagt zusätzlich, daß die Sauerstoffzunahme während der letzten 20 Minuten kleiner als 0,1 mg/l sein soll. USA empfiehlt ein Versuchsende bei  $4/k_L a$ , was etwa 98% Sättigung entspricht ( $4,6/k_L a \approx 99\%$  Sättigung).

## 2.2 Zur Versuchsauswertung

Für die Auswertung sollen in A mindestens 15 gleichmäßig über den Bereich von 10%-99% Sättigung verteilte Meßwerte verarbeitet werden. Die Ablesungen sollen zwischen 1 Minute ( $25 \text{ W/m}^3$ ) und 5 Minuten ( $5 \text{ W/m}^3$ ) getätigt werden. D verlangt mindestens 20 Werte (Ablesung 1-5 Minuten), USA sieht mindestens 20 Ablesungen vor.

In A und D ist der Belüftungskoeffizient  $k_L a$  durch Auftragung der Sättigungswerte im halblogarithmischen Netz zu bestimmen. Die Sättigungswerte sind solange zu verändern, bis sich eine Gerade ergibt. In D ist die Computerauswertung zugelassen. USA sehen in erster Linie die Computerauswertung vor. (Die Programme sind im Anhang zu finden). Die graphische Auswertung ist auch zugelassen.

Zur Umrechnung von  $k_L a$  auf die Standardtemperatur (A und D:  $10^\circ\text{C}$ , USA  $20^\circ\text{C}$ ) werden in A und D die Temperaturfunktion

$$k_{L a 10} = k_{L a T} \cdot 1,02^{10-T} \quad (14)$$

oder die von Pasveer tabellierten  $k_{10}/k_T$ -Werte verwendet. In USA wird

$$k_{La_{20}} = k_{La_T} \cdot 1.024^{10-T} \quad (15)$$

benutzt, wobei in USA statt 1.024 auch ein anderer Wert verwendet werden kann, wenn dies vorher nachgewiesen worden ist.

Die Pasveerschen Werte sind praktisch mit der Funktion des Faktors 1.02 identisch. Der Faktor 1.024 ergibt bei  $\pm 10^\circ\text{C}$  Temperaturdifferenz einen um  $\pm 4\%$  verschiedenen  $k_{La}$ -Wert bei  $\pm 5^\circ\text{C}$  sind es  $\pm 2\%$ .

Zur Berechnung von  $OC_R$  wird in A der theoretische Sättigungswert ( $c_{ss}$ ) für  $10^\circ\text{C}$  und einen Druck von 1013 mbar angesetzt, bei Druckbelüftung wird der höhere Sättigungswert nach der Gleichung

$$c_s = c_{ss} \cdot \left(1 + \frac{ET}{20.7}\right) \quad (16)$$

berechnet.

In D sollen zwar geeichte Elektroden eingesetzt werden, so daß theoretisch der bei der Auswertung gefundene Sättigungswert zur Berechnung von OC zugrundegelegt werden könnte. Die Vorschrift verlangt aber zusätzlich bei Versuchsende eine Nacheichung der Elektroden im Becken durch Winkler-Titration. Der Versuchssättigungswert wird dann auf  $10^\circ\text{C}$  und den Standarddruck von 1000 mbar umgerechnet.

In USA soll der aus dem Versuch ermittelte Sättigungswert zugrundegelegt werden. Er wird auf  $20^\circ\text{C}$  und den Standarddruck von 1013 mbar korrigiert.

Als Standard-Sättigungswerte werden in A und D die Tabellen der American Public Health Association und in den USA die in "Standard Methods" angegebenen Werte zugrundegelegt. Die Wertereihen unter-

scheiden sich voneinander, z.B. bei 1013 mbar und 10°C: 11,33 (APHA) und 11,27 mg/l (St. Meth.) bzw. 20°C: 9,17 und 9,07 mg/l.

Die Schwankungsbreite der Einzelwerte darf in A bei vier Werten (2 Versuche, 2 Elektroden)  $\pm 10\%$  vom Mittelwert betragen. Wenn mehr Versuche durchgeführt wurden oder mit mehr Elektroden gearbeitet wurde, dürfen maximal 2 Werte außerhalb des  $\pm 10\%$  Bereiches liegen. Aber auf jeden Fall müssen mindestens 2 Werte von mindestens je 2 Meßstellen (also vier Werte) im Bereich  $\pm 10\%$  vom Mittelwert liegen.

In D liegen 6 Werte (3 Meßstellen, 2 Versuche) vor. Wenn die Einzelwerte mehr als  $\pm 5\%$  vom Mittelwert abweichen, ist die Ursache zu begründen. Lassen sich die Abweichungen erklären (z.B. fehlerhafte Elektroden), so müssen aber die Werte von 2 Meßstellen der beiden Versuche im Bereich  $\pm 5\%$  liegen.

In USA wird zwischen den räumlichen Schwankungsbreiten innerhalb eines Versuches (bei vier Meßpunkten sollen 3 Werte innerhalb von  $\pm 10\%$  vom Mittelwert liegen) und der Schwankungsbreite der einzelnen Meßstellen (bei drei oder mehr Versuchen sollen für einen Meßpunkt die Werte innerhalb von  $\pm 15\%$  vom Mittelwert des Meßpunktes liegen) unterscheiden. Wenn diese Bedingungen erfüllt sind, wird das Gesamtmittel gebildet, welches  $OC_R$  ergibt.

Der Sauerstofffertrag wird in A und D immer auf die Brutto-Leistungsaufnahme bezogen. USA läßt auch die Netto-Leistungsaufnahme zu. Dies muß angegeben werden.

Neben dem Sauerstofffertrag soll in USA noch die Sauerstoffausnutzung (%) angegeben werden. Zugrundegelegt werden dabei Normalbedingungen für Luft: 20°C, 1013 mbar, 36% relative Luftfeuchte. In A und D finden sich keine Angaben zur Sauerstoffausnutzung.

### 3. Praxis bei Reinwasserversuchen

Im Grundsatz halten wir uns an die deutsche Arbeitsanleitung. Eingegangen wird im folgenden daher nur auf einige wichtige Dinge und Unterschiede.

#### 3.1 Versuchsdurchführung

Der kritischste Teil der Versuchsdurchführung ist die gleichmäßige Verteilung des Natriumsulfits. Zu hohe Überdosierungen, wie sie die deutsche Arbeitsanleitung vorschreibt, sind nicht immer praktikabel. Bei einer halben Stunde Mischzeit sind z.B. für eine Anlage mit  $B_{TS} = 0,05 \text{ kg/kg}\cdot\text{d}$  mit einer Sauerstoffzufuhr von  $30 \text{ g/m}^3\cdot\text{h}$  rd.  $15 \text{ g O}_2$  zusätzlich zu binden, was in etwa einer Überdosierung von 100% entspricht. Bei einer Hochlastanlage mit z.B.  $150 \text{ g O}_2/\text{m}^3\cdot\text{h}$  würde sich bei halbstündiger Mischzeit eine Überdosierung von mehr als 500% ergeben. In der Praxis kommt man, wie viele Versuche gezeigt haben, mit maximal 100% Überdosierung aus.

In Druckluftanlagen mit getrennter Umwälzung wird Natriumsulfit bei abgestellter Belüftung und laufender Mischeinrichtung trocken oder aufgelöst zugegeben. Danach sollte man möglichst eine halbe Stunde (bei laufender Mischeinrichtung) warten, bis man die Belüftung einschaltet. Bei Druckluftbecken ohne Mischeinrichtung muß Natriumsulfit bei geringster Belüftung möglichst gleichmäßig über die Beckenlänge oder die Beckenoberfläche zugegeben werden. Bei Kreiseln sollte an jedem Kreisel die gleiche Sulfitmenge zugegeben werden. Es empfiehlt sich dabei mit kleinster Drehzahl zu arbeiten.

Bei Mammrotor- und Karussellbecken muß das Sulfit bei der zu testenden Belüftungsleistung zugegeben werden, damit der Versuch bei stabilen Strömungsverhältnissen beginnt. Um eine gleichmäßige Verteilung sicherzustellen, ist die gleichzeitige Zugabe an möglichst vielen Punkten (in gleichen Distanzen) notwendig. Dies erfordert kurzzeitig viel Personal.



Bei Druckluftanlagen erfassen wir stets auch die Luftmengen. Diese ermitteln wir für die herrschenden Druckverhältnisse aus den Gebläse-kennlinien und falls vorhanden, nach Luftmengenmessungen.

### 3.2 Auswertung

Wir werten unsere Versuche nur noch mittels Rechner aus. Bewährt hat sich der Kleinrechner EPSON HX20. Die Meßwerte werden über einen Digitalwandler unmittelbar in den Rechner gegeben. Da der Rechner maximal 50 Wertepaare pro Meßstelle verarbeiten kann, muß man vorher die Versuchsdauer abschätzen. Hierzu kann man die Graphik auf Abb. 2 benutzen. Nach dem Versuch erfolgt dann unmittelbar die Berechnung der wesentlichen Daten. Vom Rechner erhält man einen Ausdruck der Eingabedaten, das sind die Konzentrationen  $c(i)$  zu den Zeiten  $t(i)$  und einen Ausdruck, der sich nach Gl. 8 mit den berechneten Parametern  $k_L a$  und  $c_s$  zu den Zeiten  $t(i)$  ergebenden Funktionswerte  $f(i)$  sowie die Residuen  $R(i) = c(i) - f(i)$ . Schließlich werden der Sättigungswert ( $c_s$ ), der Belüftungskoeffizient  $k = k_L a$ ,  $OC_{10}$  und  $OP_{10}$  sowie der Standard Schätzfehler ausgedruckt und der Verlauf von  $R(i)$  graphisch dargestellt. Bei Druckluftsystemen wird der für die Berechnung von  $OC$  notwendige Sättigungswert für den Druck bei halber Einblastiefe (Gl. 16) zugrundegelegt.

Die Güte des Versuchs wird in erster Linie durch den Verlauf der Residuen gekennzeichnet. Zufällige Schwankungen, d.h. zufällige Verteilung der Vorzeichen der Residuen deuten auf einen gut verlaufenden Versuch. Eine wellenartige Schwankung der Residuen ergibt sich bei Reinwasserversuchen meist dann, wenn die ersten Meßwerte z.B. durch ungleichmäßige Sulfitverteilung fehlerhaft sind. Läßt man bei einer erneuten Berechnung die ersten Werte fort, so erhält man in aller Regel ein brauchbares Ergebnis. Das Ergebnis eines Versuches ist auf der folgenden Seite zusammengestellt.

- Datum : 2.4.85  
 Versuch: 11  
 Sonde : BLAU

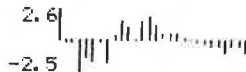
## COMPUTER AUSWERTUNG EINES REINWASSERVERSUCHS

Wassertemp: 10.10 Grd C  
 Volumen : 1941 cbm  
 Leistung : 130.00 kW  
 Eintaucht.: 0.00 cm  
 Drehzahl : 29.90 U/min

I	T(I) min.	C(I) mg/l	I	F(I) mg/l	R(I) mg/l
1	0.00	4.81	1	2.19	2.62
2	0.75	13.94	2	14.06	-0.12
3	1.50	24.42	3	24.49	-0.07
4	2.25	31.11	4	33.67	-2.56
5	3.00	40.34	5	41.74	-1.39
6	3.75	47.06	6	48.83	-1.77
7	4.50	54.92	7	55.06	-0.14
8	5.25	58.78	8	60.55	-1.77
9	6.00	65.69	9	65.37	0.32
10	6.75	71.16	10	69.60	1.56
11	7.50	74.43	11	73.33	1.10
12	8.25	76.65	12	76.60	0.05
13	9.00	80.95	13	79.49	1.47
14	9.75	83.83	14	82.02	1.82
15	10.50	85.40	15	84.24	1.15
16	11.25	86.74	16	86.20	0.54
17	12.00	88.42	17	87.92	0.50
18	12.75	90.21	18	89.44	0.77
19	13.50	90.99	19	90.77	0.22
20	14.25	91.99	20	91.94	0.05
21	15.00	92.82	21	92.96	-0.14
22	15.75	93.60	22	93.87	-0.27
23	16.50	94.16	23	94.66	-0.50
24	17.25	94.85	24	95.36	-0.51
25	18.00	94.97	25	95.99	-1.01
26	18.75	96.07	26	96.52	-0.45
27	19.50	96.48	27	96.99	-0.51
28	20.25	96.43	28	97.41	-0.97

Std. err. : 1.26  
 c<sub>s</sub> : 100.45 mg/l  
 k : 19.30 1/h  
 OC10 : 222.0 kg/h  
 OP : 1.71 kg/kWh

Residuen:



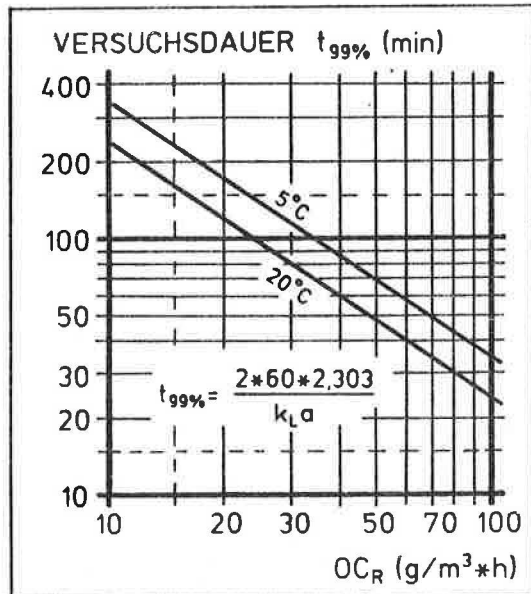


Abb. 2: Diagramm zur Abschätzung der Versuchsdauer

Neben  $OC_R$  und  $OP$  berechnen wir von Druckluftanlagen stets die spezifische Sauerstoffzufuhr in g  $O_2$ /m<sup>3</sup>(Luft)·m(Einblastiefe). Es empfiehlt sich, auch die spezifische Einblasenergie als Wh/m<sup>3</sup>(Luft)·m(Einblastiefe) zu berechnen. Die Einblasenergie liegt bei Drehkolbengebläsen bei 5 Wh/m<sup>3</sup>·m (6,0-4,5), bei Schraubenverdichtern zwischen 3,5 und 4,5 Wh/m<sup>3</sup>·m. Werte außerhalb dieser Bereiche lassen entweder auf fehlerhafte Energie- oder Luftmengenmessung schließen.

### 3.3 Annahme des Sättigungswertes

Abgesehen von Kleinigkeiten bestehen wesentliche Unterschiede zwischen den standardisierten Verfahrensvorschriften nur hinsichtlich der Bestimmung der Sättigungswerte. Man muß sich dazu noch einmal verdeutlichen, daß, unabhängig vom Auswerteverfahren, der Belüftungskoeffizient ( $k_L a$ ) von der Elektrodenanordnung nicht beeinflusst wird.

Jeder, der Garantievorsuche durchgeführt hat, weiß, wie lästig das hantieren mit der chemischen Sauerstoffbestimmung ist: Meist arbeitet man auf einer Baustelle, es gibt kein Labor, überall ist Dreck und das Wetter ist schlecht. Wir haben daher in der Vergangenheit entgegen der deutschen Arbeitsanleitung den Sättigungswert stets nach Gl. 16 theoretisch berechnet. Aus Versuchen mit geeichten Elektroden wissen wir, daß der Sättigungswert nicht größer, als er sich nach Gl. 16 ergibt, werden kann. Häufiger entspricht er etwa den Druckverhältnissen bei einem Drittel der Einblastiefe.

Die Unterschiede zwischen den Sättigungswerten bezogen auf die halbe und eindrittel der Einblastiefe betragen bei 3,0 m Einblastiefe rd. 4,4%, bei 4,0 m rd. 5,7% und bei 5 m rd. 7%. Wenn man also nach Gl. 16 den Sättigungswert berechnet, kann man die Sauerstoffzufuhr bei 4 m Einblastiefe um bis zu 5,7% zu hoch berechnen. Da dies zugunsten des Lieferanten geht, gibt es von daher sicher keine Einwände gegen die Verwendung von Gl. 16.

In Becken mit größeren Einblastiefen empfiehlt sich eine exaktere Bestimmung des Sättigungswertes. Hierzu sind chemische Sauerstoffbestimmungen nicht notwendig, sondern es genügt, jeweils festzustellen, um wieviel höher der Sättigungswert bei Versuchsende im Becken gegenüber den Bedingungen in einem sehr flachen Gefäß, d.h. unter normalen atmosphärischen Verhältnissen, ist. Um Fehler soweit als möglich zu eliminieren, sollte in dem Gefäß das gleiche Wasser wie im Becken (gleiche Salzgehalte) verwendet werden und die Temperatur im Gefäß sollte möglichst gleich der Beckentemperatur sein. Wir sind bei Messungen an einer Turmbiologie wie folgt vorgegangen:

Jeweils etwa bei halber Versuchszeit wurde ein Eimer Wasser aus dem Becken entnommen und intensiv belüftet. Der Eimer stand in einem Wasserbad, so daß er die Beckentemperatur behielt. In dem Eimer wurde eine Sauerstoffelektrode (Referenzelektrode) plaziert. Bei Versuchsende hatte sich der Sauerstoffgehalt im Eimer auf einen konstanten Wert eingestellt, die anfängliche Übersättigung war beseitigt. Jetzt wurde die Anzeige der Referenzelektrode auf einen solchen Wert eingestellt, daß ohne Meßbereichumschaltung der im Becken höhere



Sauerstoffgehalt abgelesen werden konnte (z.B. bei 19,5 m Einblas-  
tiefe auf 50% Sättigung). Dann wurde die Referenzelektrode ins  
Becken gelassen und hinreichend bewegt (auf- und abgezogen). Zugleich  
wurden dann die Referenzelektrode und die im Becken installierten  
Elektroden abgelesen. Messungen in verschiedenen Tiefen haben dabei  
ergeben, daß die Übersättigung Überall gleich war. Es genügt also,  
die Übersättigung an einer Stelle zu messen. Nach der Versuchsaus-  
wertung wurden die berechneten Sättigungswerte ( $c_s$ ) mit den Elektro-  
denablesungen bei der Übersättigungsmessung verglichen. Bei Ab-  
weichungen wurde der an der Referenzelektrode gemessene Wert ent-  
sprechend korrigiert.

Zur Berechnung von  $OC_R$  wurde der theoretische Sättigungswert mit der  
Übersättigung, das ist das Verhältnis der prozentualen Sättigung im  
Becken zu der im Eimer multipliziert.

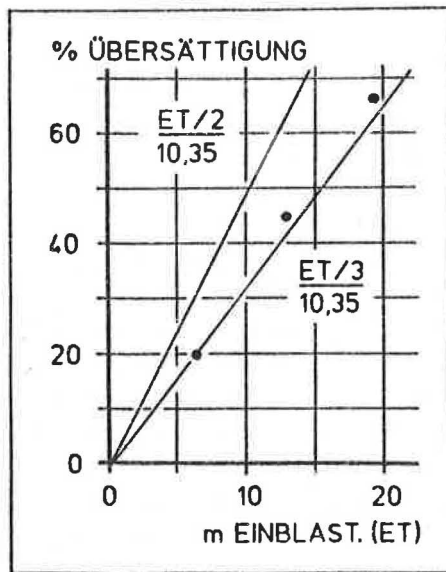


Abb. 3: Übersättigung in Abhängigkeit von der Einblastiefe

Die Ergebnisse von Messungen bei drei Einblastiefen sind auf Abb. 3 dargestellt. Es bestätigt sich auch hier, daß die Sättigungswerte eher den Druckverhältnissen bei einem Drittel der Einblastiefe entsprechen.

#### 4. Messungen unter Betriebsbedingungen

##### 4.1 Grundsätzliches

Messungen unter Betriebsbedingungen liefern nur brauchbare Ergebnisse, wenn die Atmung während des Versuches konstant ist. Eine abnehmende Atmung führt bei Desorptionsversuchen zu zu großen und bei Absorptionsversuchen zu zu kleinen Belüftungskoeffizienten. Umgekehrt ist es bei steigender Atmung.

Wenn man also Desorptionsversuche bei abgestellter Abwasserzufuhr (was möglichst immer angestrebt werden sollte) durchführt, erhält man eher etwas zu günstige Sauerstoffzufuhrwerte, weil die Atmung, wenn auch nur geringfügig, ständig abnimmt. Wir bevorzugen daher Desorptionsversuche, bei denen der Sauerstoffgehalt durch Zugabe von  $H_2O_2$  künstlich angehoben wird.

##### 4.2 Versuchstechnik

Die Versuchstechnik ist bei Kayser (1982) eingehend beschrieben. Gegenüber Reinwasserversuchen ist erschwerend, daß für die Einmischung des Peroxids die Belüftung nicht abgestellt werden kann. Langgestreckte Belüftungsbecken und Umlaufbecken stellen hohe Anforderungen bei der Peroxideinbringung. Wir verwenden Faßpumpen, von denen über einen oder mehrere gleichlange Schläuche und Rohre das Peroxid an der Beckensohle eingeleitet wird. Wichtig ist die gleichzeitige und gleichlange Einleitung. Bei Schreiberbecken pumpen wir das Peroxid von der laufenden Brücke ein. Dabei haben wir anfangs den Fehler gemacht, zu schnell zu pumpen. Da die Brücke sich zwar mit etwa 0,8 m/s bewegt, das Wasser aber auch umläuft, beträgt die

Differenzgeschwindigkeit nur rd. 0,3 m/s. Bei dem schnellen Einpumpen lief dann eine Wolke mit sehr hohen Sauerstoffgehalten im Becken um. Wir drosseln daher jetzt die Pumpe so, daß die erforderliche Menge an Peroxid während 5-8 Brückenumläufen zugegeben wird.

Auf kleineren Anlagen ist es meist nicht möglich, die Abwasserzufuhr abzustellen. Wir haben uns in einem Fall dadurch geholfen, daß wir die Zulaufpumpe in festen Zeitabständen für jeweils eine konstante Dauer eingeschaltet haben. Ein leichter Rückstau ins Kanalnetz mußte dabei hingenommen werden.

#### 4.3 Auswertung

Die Messungen unter Betriebsbedingungen werden, ob Absorption oder Desorption, in gleicher Weise wie Reinwasserversuche ausgewertet (vgl. 3.2).

#### 4.4 Andere Meßverfahren

Seitdem automatische kontinuierliche Atmungsmeßgeräte auf dem Markt sind, wird auf der Grundlage solcher Atmungsmessungen und zugehöriger Sauerstoffgehaltsmessungen die Sauerstoffzufuhr nach einer vereinfachten Form von Gl. 9 berechnet:

$$OC_R = \frac{OV_R \cdot c_{SS}}{c_{SS} - c}$$

Man erhält nur halbwegs zutreffende Werte, wenn der Sauerstoffgehalt im gesamten Becken größer als null ist, und wenn die im Becken herrschende mittlere Atmung und der mittlere Sauerstoffgehalt eingesetzt werden. Dies ist nicht machbar, daher wird dann von Messungen an "repräsentativer Stelle" gesprochen. Die Meßergebnisse bleiben zweifelhaft.

CSB-Bilanzen werden oft auch zur Berechnung der Sauerstoffzufuhr herangezogen. Aus der CSB-Bilanz, die schon mindestens eine Woche erfassen muß, errechnet man den mittleren Sauerstoffverbrauch ( $OV_R$ ). Das Problem ist dann, welcher Sauerstoffgehalt diesem zuzuordnen ist, um nach obiger Gleichung  $OC_R$  zu berechnen.

## 5. Grenzen der Sauerstoffzufuhrmessung

### 5.1 Becken- und Belüftergeometrie

Die Gleichungen zur Auswertung von Sauerstoffzufuhrversuchen setzen total durchmischte Becken voraus, d.h. theoretisch sollte z.B. unter Betriebsbedingungen bei überall konstanter Atmung an vergleichbaren Stellen im Becken der gleiche Sauerstoffgehalt gemessen werden. Längs eines Druckluftbeckens mit abgestufter Belüfteranordnung oder in Becken mit mehreren verschieden großen Kreiseln in Reihe ist dies sicher nicht der Fall. Auch in längsdurchflossenen Becken mit nachträglich eingebauten Zusatzaggregaten kann sich nicht überall der gleiche Sauerstoffgehalt einstellen. Um für solche Verhältnisse eine Aussage zu erhalten, besteht grundsätzlich nur die Möglichkeit mit einer Vielzahl von Elektroden zu arbeiten. Dabei sollte jede Elektrode einen gleichgroßen Beckenteil erfassen um  $OC_R$  aus dem Mittel der  $k_L a$ -Werte berechnen zu können.

Alle Umlaufbecken nehmen eine Sonderstellung ein; auch mit ungleichmäßig angeordneten Belüftern läßt sich die Sauerstoffzufuhr berechnen. Ein Extrem ist z.B. ein Oxydationsgraben mit nur einer Walze. Hier bleibt im Idealfall der Sauerstoffgehalt für jeweils die Dauer einer Umlaufzeit in etwa konstant (Abb. 4). Für die Auswertung zieht man entweder eine Hüllkurve, oder man greift die jeweiligen Hochpunkte ab.

### 5.2 Größe von $OC_R$

Aus Abb. 2 geht hervor, daß bei kleinen Sauerstoffzufuhrwerten die Versuchsdauer sehr groß wird, z.B.  $OC_R = 10 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ , Versuchsdauer rd. 5 Stunden. Bei so geringen Belüftungsleistungen ist als Nebeneffekt, z.B. in belüfteten Abwasserteichen, mit punktueller Belüftung, die Durchmischung schlecht, so daß man dann fragwürdige Ergebnisse erhält.

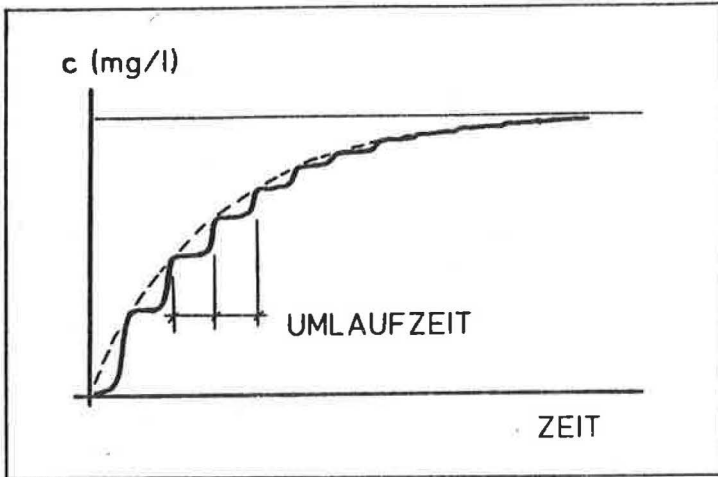


Abb. 4: Belüftungskurve in Umlaufbecken mit einem Belüfter

### 5.3 Druckluftverteilung

Bei Druckluftanlagen mit einer zentralen Gebläsestation und einer Verteilung der Luft auf mehrere Becken sind Sauerstoffzufuhrversuche nur sinnvoll, wenn die Luftmenge des zu untersuchenden Beckens gemessen wird. Die Hoffnung, daß sich die Luft von selbst gleichmäßig auf gleichgroße Becken verteilt, erweist sich meist als Illusion. In solchen Druckluftanlagen sind daher Messungen unter Betriebsbedingungen relativ aufwendig, weil Meßanlagen eingebaut werden müssen.

### 6. Ausblick

Zur weiteren Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung von Sauerstoffzufuhrversuchen erscheint mir folgendes wünschenswert:

- 1) Das zu verwendende "Reinwasser" müßte, wenn es kein Leitungswasser ist, genauer charakterisiert werden. Es muß frei von Detergentien sein, es darf Salze enthalten (wir geben ja mit dem Natriumsulfit auch Salze zu), und es darf auch organische Stoffe enthalten,

bei Grundwasser z.B. Huminstoffe. Generell sollte von Reinwasser der Abdampfrückstand (Salzgehalt), die elektrolyt. Leitfähigkeit und der TOC (bzw. DOC) bestimmt werden.

- 2) Die Zugabe von  $0,5 \text{ g/m}^3$  Kobalt erscheint bei Temperaturen über  $10^\circ\text{C}$  hinreichend. Höhere Dosierungen sind nur bei tieferen Temperaturen und Wässern mit erhöhten Gehalten an organischen Substanzen angebracht, wegen der Komplexierung des Kobalts.
- 3) Die Überdosierung des Natriumsulfites sollte flexibel gehalten werden, d.h. es sollte keine festgelegten Vorlaufzeiten geben.
- 4) Drei Meßstellen (Elektroden) sollten mindestens gefordert werden.
- 5) Die Auswertung sollte in der Regel mittels Computer erfolgen. Dazu sollte das im Anhang abgedruckte Programm verwendet werden.
- 6) Für jeden Versuch sollte die Sauerstoffzufuhr ( $\text{OC}_R$ ) auf der Grundlage des Mittels der  $k_{La}$ -Werte berechnet werden. Dabei sollten die  $k_{La}$ -Werte nicht mehr als  $\pm 10\%$  vom Mittel abweichen. Wenn bei ungleichmäßiger Belüfterverteilung mit mehr als drei Elektroden gearbeitet wird, sind höhere Abweichungen zulässig.
- 7) Es ist wünschenswert, sich weltweit auf eine einheitliche Bezugstemperatur zu einigen, ich schlage  $20^\circ\text{C}$  vor. Das gleiche gilt für den Bezugsdruck, ich schlage 1013 mbar (760 mm Hg) vor.
- 8) Als Standard-Sättigungswerte sollten die in Standard-Methods angegebenen verwendet werden.
- 9) Bei Oberflächenbelüftern sollte zur Berechnung von  $\text{OC}_R$  der Standard-Sättigungswert (bei  $20^\circ\text{C}$ :  $c_{SS} = 9,07 \text{ mg/l}$ ) angesetzt werden.

- 10) Bei Druckluftsystemen mit Einblastiefen bis zu 5,0 m sollte der Sättigungswert für den Druck bei halber Einblastiefe nach Gl. 16 korrigiert werden.
- 11) In Becken mit größeren Einblastiefen als 5,0 m oder bei kombinierten Belüftungssystemen ist die Übersättigung zu Versuchsende mit einer Referenzelektrode zu messen und damit der Standard-Sättigungswert zu korrigieren (vgl. dazu 3.3), oder der Sättigungswert ist durch chemische Analyse nach Winkler zu bestimmen.
- 12) Für Garantiemessungen sollten mindestens drei Versuche durchgeführt werden. Die dann mindestens drei  $OC_R$ -Werte sollten nicht mehr als  $\pm 10\%$  voneinander abweichen. Die Garantie sollte als erfüllt gelten, wenn der garantierte  $OC_R$ -Wert nicht mehr als 10% unter dem gemittelten  $OC_R$ -Wert liegt. Das gleiche soll für den Sauerstofftrag gelten.
- 13) Die Bieter sollten stets  $OC_R$  und OP für Reinwasser und für Betriebsbedingungen angeben.
- 14) Bei Messungen unter Betriebsbedingungen gelten die oben gegebenen Empfehlungen entsprechend. Bei Einblastiefen über 5,0 m oder bei kombinierten Belüftungssystemen muß für den Sättigungswert eine Annahme (z.B. auf der Grundlage vorausgegangener Reinwassermessungen oder nach Literatur) getroffen werden.
- 15) Bei Messungen unter Betriebsbedingungen sollten die  $\alpha \cdot k_L a$ -Werte eines Versuchs nicht mehr als  $\pm 15\%$  vom Mittelwert abweichen. Die  $OC_{R(B)}$ -Werte von nacheinander durchgeführten Versuchen sollten nicht mehr als 15% vom Mittelwert abweichen. Die Garantie sollte auch als erfüllt gelten, wenn der garantierte Wert um 15% unter dem Mittelwert der Versuche liegt.

- 16) Garantiemessungen sollten nicht für jede kleine Kläranlage und sonst nur noch dann durchgeführt werden, wenn die garantierten Werte weit von dem abweichen, was bisher an vergleichbaren Systemen gemessen worden ist. Hierzu dürften die weiteren Vorträge wertvolle Beiträge liefern.

## 7. Literatur

- A           DINORM M 5888: Sauerstoffzufuhr-Leistung von Belüftungseinrichtungen - Bestimmung in Reinwasser.
- D           Arbeitsanleitung für die Bestimmung der Sauerstoffzufuhr von Belüftungssystemen in Reinwasser. Korresp. Abwasser 26 (1979), S. 416-423.
- USA         A Standard for the Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water. Herausgeber: American Society of Civil Engineers, USA.
- Kayser R.:   Wirtschaftlichkeit verschiedener Belüftungssysteme unter Betriebsbedingungen. Wiener Mitteilungen Band 47 (1982), S. Q-1-26.
- Standard Methods for the Examination of water and wastewater. 15. Ed, 1980.  
Herausgegeben von APHA, AWWA, WPCF

KAYSER Rolf, Prof. Dr.-Ing.  
Technische Universität Braunschweig  
Institut für Stadtbauwesen  
Abt. Siedlungswasserwirtschaft  
Postfach 3329  
D-3300 Braunschweig



# ANHANG: AUSWERTEPROGRAMM

```
10 D$ = CRR$ (4)
20 REM
30 REM NON-LINEAR LEAST SQUARES PROGRAM IN APPLE II BASIC
40 REM FOR OXYGEN TRANSFER PARAMETERS
50 REM OUTPUT SETUP FOR 40 POSITION CRT/MONITOR
60 TEXT : CALL - 936: RFM CLEARS SCREEN
70 REM
80 REM ::::::::::::::::::::
90 REM STEP 1
100 REM WRITE TITLES
110 REM ::::::::::::::::::::
120 REM
130 PRINT "*****"
140 PRINT "      NON-LINEAR ESTIMATION FOR"
150 PRINT "      UNSTEADY-STATE OXYGEN TRANSFER"
160 PRINT "*****"
170 PRINT "      BY"
180 PRINT "LINFIELD C. BROWN & GEORGE R. FISETTE"
190 PRINT "VERSION 1.0-NOVEMBER 11, 1979"
200 PRINT
210 INVERSE : PRINT "THE VALUES ARE TRUNCATED": PRINT "AND NOT ROUNDED OFF."
RINT : NORMAL
220 REM
230 REM PROGRAM HAS MAXIMUM LIMIT OF 30 DATA POINTS
240 REM
250 DIM C(30),T(30),P(30),R(30)
260 INPUT "IS DATA IN DISK FILE;Y/N?";A$
270 INPUT "INPUT NAME OF DATE FILL?";N$
280 IF A$ = " " GOTO 650: REM GET DATA FROM DISK FILL
290 INPUT "DO YOU WANT INPUT DATA SAVED ON DISK,Y/N?";A$
300 PRINT "INPUT DATA IN TIME,DO DATA PAIRS"
310 PRINT "INPUT 999,999 AS LAST DATA PAIR"
320 FOR I = 1 TO 30
330 INPUT T(I),C(I)
340 IF T(I) = 999.0 GOTO 360
350 NEXT I
360 ND = I - 1.0
370 INPUT "BEST ESTIMATE FOR C-STAR OR USE 10.0 MG/L?";CS
380 INPUT "BEST ESTIMATE FOR C-ZERO OR USE 0.0 MG/L?";CO
390 INPUT "BEST ESTIMATE FOR KLA-PRIME OR USE 4.0 1/HR?";XK
400 XK = XK / 60.0
410 IF A$ = "N" GOTO 790
420 REM
430 REM WRITE DATA TO DISK FILE
440 REM SPECIFIC FOR APPLE/MICROSOFT BASIC
450 REM
460 PRINT D$;"OPEN "N$;" ,VO,L15"
470 FOR I = 1 TO ND
480 PRINT D$;"WRITE "N$;" ,BO,R";I
490 PRINT T(I): PRINT C(I)
500 NEXT I
510 PRINT D$;"WRITE "N$;" ,BO,RO"
520 PRINT ND
530 PRINT D$;"WRITE "N$;" ,BO,R";ND + 1.
540 PRINT CS
```

```
550 PRINT D$;"WRITE "N$;" ,BO,R";ND + 2.
560 PRINT CO
570 PRINT D$;"WRITE "N$;" ,BO,R";ND + 3.
580 PRINT XK
590 PRINT D$;"CLOSE "N$
600 GOTO 790
610 REM
620 REM READ DISK FILE FOR DATA
630 REM SPECIFIC FOR APPLE/MICROSOFT BASIC
640 REM
650 PRINT D$;"OPEN "N$;" ,VO,L15"
660 PRINT D$;"READ "N$;" ,BO,RO"
670 INPUT ND
680 FOR I = 1 TO ND
690 PRINT D$;"READ "N$;" ,BO,R";I
700 INPUT T(I),C(I)
710 NEXT I
720 PRINT D$;"READ "N$;" ,BO,R";ND + 1.
730 INPUT CS
740 PRINT D$;"READ "N$;" ,BO,R";ND + 2.
750 INPUT CO
760 PRINT D$;"READ "N$;" ,BO,R";ND + 3.
770 INPUT XK
780 PRINT D$;"CLOSE "N$
790 PRINT : FLASH : INPUT "HIT RETURN FOR ITERATIONS.";I$: NORMAL
800 CALL 936: PRINT : PRINT " DATA SLT ";N$: PRINT
810 PRINT "ITERATION" TAB( 11)"C-STAR" TAB( 18)"C-ZERO" TAB( 26)"KLA" TAB ( 33)"
SUM OF"
820 PRINT TAB( 2)"NUMBER" TAB( 26)"PRIME" TAB( 33)"SQUARES"
830 PRINT TAB ( 11)"(MG/L)" TAB( 18)"(MG/L)" TAB ( 26)"(1/HR"
840 PRINT
850 REM
860 REM ::::::::::::::::::::
870 REM STEP 2
880 REM INITIALIZATION OF VARIABLES
890 REM DO ITERATION CALCULATIONS
900 REM ::::::::::::::::::::
910 REM
920 K% = 0
930 OS = 0.0
940 FOR I = 1 TO ND
950 F(I) = CS - (CS - CO) * EXP ( - XK * T(I))
960 R(I) = C(I) - F(I)
970 OS = OS + R(I) * R(I)
980 NEXT I
990 ZZ$ = STR$( CS ) :VA = 5.: GOSUB 2900
1000 CS$ = ZZ$:ZZ$ = STR$( CO): GOSUB 2900
1010 CO$ = ZZ$:AA$ = STR$( XK * 60.): GOSUB 2900
1020 XK$ = ZZ$:ZZ$ = STR$( OS): GOSUB 2900
1030 OS$ = ZZ$
1040 PRINT TAB( 4)K% TAB( 10)CS$ TAB( 18)CO$ TAB( 26)XK$ TAB( 33)OS$
1050 GOTO 1070
1060 REM
1070 REM CALCULATION LOOP - INITILIZE VARIABLES
```

```
1080 REM
1090 K% = K% + 1
1100 A1 = 0.0
1110 A2 = 0.0
1120 A3 = 0.0
1130 A4 = 0.0
1140 A5 = 0.0
1150 A6 = 0.0
1160 C1 = 0.0
1170 C2 = 0.0
1180 C3 = 0.0
1190 SQ = 0.0
1200 REM
1210 REM ::::::::::::::::::::
1220 REM STEP 3
1230 REM SETUP NORMAL EQUATIONS FOR LINEARIZED MODEL
1240 REM USING CURRENT LEAST SQUARE ESTIMATES
1250 REM ::::::::::::::::::::
1260 REM
1270 FOR I = 1 TO ND
1280 Z2 = EXP ( - XK * T(I))
1290 Z1 = 1.0 - Z2
1300 Z3 = T(I) * Z2 * (CS - CO)
1310 A1 = A1 + Z1 * Z1
1320 A2 = A2 + Z1 * Z2
1330 A3 = A3 + Z1 * Z3
1340 A4 = A4 + Z2 * Z2
1350 A5 = A5 + Z2 * Z3
1360 A6 = A6 + Z3 * Z3
1370 F(I) = CS - (CS - CO) * Z2
1380 R(I) = C(I) - F(I)
1390 C1 = C1 + R(I) * Z1
1400 C2 = C2 + R(I) * Z2
1410 C3 = C3 + R(I) * Z3
1420 NEXT I
1430 REM
1440 REM ::::::::::::::::::::
1450 REM STEP 4
1460 REM SOLUTION OF NORMAL EQUATIONS FOR CORRECTIONS
1470 REM TO THE PRIOR LEAST SQUARES ESTIMATES
1480 REM ::::::::::::::::::::
1490 REM
1500 D1 = A1 * A4 - A2 * A2
1510 D2 = A1 * C3 - A3 * C1
1520 D3 = A1 * A5 - A3 * A2
1530 D4 = A6 * A1 - A3 * A3
1540 D5 = A1 * C2 - A2 * C1
1550 XN = D1 * D2 - D3 * D5
1560 XD = D1 * D4 - D3 * D3
1570 X3 = XN / XD
1580 YN = D5 - D3 * X3
1590 X2 = YN / D1
1600 X1 = (C1 - A2 * X2 - A3 * X3) / A1
1610 REM
```



```
2150 REM
2160 ZZ$ = STR$ (T1): GOSUB 2900
2170 T1$ = ZZ$:ZZ$ = STR$ (T2): GOSUB 2900
2180 T2$ = ZZ$:ZZ$ = STR$ (T3 * 60.): SOSUB 2900
2190 T3$ = ZZ$:ZZ$ = STR$ (SQ): GOSUB 2900
2200 SQ$ = ZZ$
2210 PRINT TAB( 4)K% TAB( 10)T1$ TAB( 18)T2$ TAB( 26)T3$ TAB( 33)SQ$
2220 PRINT
2230 REM
2240 REM ::::::::::::::::::::
2250 REM STEP 7
2260 REM COMPUTE STANDARD DEVIATIONS OF PARAMETER ESTIMATES
2270 REM ::::::::::::::::::::
2280 REM
2290 XP = ND - 3.0
2300 RS = SQ / XF
2310 BR = SQR (RS)
2320 PRINT "STD DEVIATIONS OF PARAMETER ESTIMATES"
2330 PRINT
2340 DP = A1 * A4 * A6 + 2.0 * A2 * A3 * A5
2350 DN = A1 * A5 * A5 + A4 * A3 * A3 + A6 * A2 * A2
2360 DT = DP - DN
2370 F1 = A4 * A6 - A5 * A5
2380 F2 = A1 * A6 - A3 * A3
2390 F3 = A1 * A4 - A2 * A2
2400 V1 = (F1 / DT) * RS
2410 V2 = (F2 / DT) * RS
2420 V3 = (F3 / DT) * RS
2430 S1 = SQR (V1)
2440 S2 = SQR (V2)
2450 S3 = SQR (V3)
2460 ZZ$ = STR$ (S1):VA = 5.: GOSUB 2900
2470 S1$ = ZZ$:ZZ$ = STR$ (S2): GOSUB 2900
2480 S2$ = ZZ$:ZZ$ = STR$ (S3 * 60.): GOSUB 2900
2490 S3$ = ZZ$
2500 PRINT " UNITS" TAB( 10)S1$ TAB( 18)S2$ TAB( 26)S3$
2510 S1 = S1 / CS * 100.0
2520 S2 = S2 / CO * 100.0
2530 S3 = S3 / XK * 100.0
2540 ZZ$ = STR$ (S1):VA = 3.: GOSUB 2900
2550 S1$ = ZZ$:ZZ$ = STR$ (S2): GOSUB 2900
2560 S2$ = ZZ$:ZZ$ = STR$ (S3): GOSUB 2900
2570 S3$ = ZZ$
2580 PRINT "% OF LSE" TAB( 10)S1$ TAB( 18)S2$ TAB( 26)S3$
2590 PRINT
2600 ZZ$ = STR$ (ER):VA = 4.: GOSUB 2900
2610 ER$ = ZZ$
2620 PRINT "ESTIMATE OF ERROR = ";FR$
2630 REM
2640 REM ::::::::::::::::::::
2650 REM STEP 8
2660 REM WRITE SUMMARY
2670 REM ::::::::::::::::::::
2680 REM
2690 PRINT
2700 FLASH : INPUT "HIT RETURN FOR SUMMARY OF DATA.:I$: NORMAL
```

```
2710 CALL - 936: PRINT : PRINT : REM  CLEARS SCREEN
2720 PRINT TAB( 13)"SUMMARY OF DATA"
2730 PRINT : PRINT
2740 PRINT TAB( 8)"TIME" TAB( 16)"CONC" TAB( 22)"FIT VALUE" TAB( 32)"RESIDUAL"
2750 PRINT TAB( 8)"(MIN)" TAB( 15)"(MG/L)" TAB( 23)"MG/L"
2760 PRINT
2770 FOR I = 1 TO ND
2780 ZZ$ = STR$( F(I)):VA = 4.: GOSUB 2900
2790 H1$ = ZZ$:ZZ$ = STR$( R(I)): GOSUB 2900
2800 H2$ = ZZ$
2810 PRINT TAB( 2)I TAB( 8)T(I) TAB( 16)C(I) TAB( 25)H1$ TAB( 33)H2$
2820 NEXT I
2830 PRINT : PRINT
2840 PRINT "*****"
2850 END
2860 REM
2870 REM  OUTPUT FORMATTING ROUTINES
2880 REM  SPECIFIC FOR APPLE/MICROSOFT BASIC
2890 REM
2900 LL = LEN (ZZ$)
2910 IF LL 12 THEN ZZ$ = LEFT$ (ZZ$,VA): RETURN
2920 IF MID$ (ZZ$,LL - 2,1) = "+" THEN ZZ$ = LEFT$ (ZZ$,VA - 3) + RIGHT$ (ZZ
$ 3): RETURN
2930 CC = 2.: IF LEFT$ (ZZ$,1) "-" THEN CC = 1.
2940 IF MID$ (ZZ$,LL - 3,1) = "R" THEN RL = VAL (RIGHT$ (ZZ$,2)):NN$ = MID$
(ZZ$,CC,1): FOR J = 1 TO BE:NN$ = "0" + NN$: NEXT J:ZZ$ = "." NN$ + MID$ (Z
Z$,CC + 2,LL - 4): IF CC = 2. THEN ZZ$ = "-" + ZZ$
2950 ZZ$ = LEFT$ (ZZ$,VA): RETURN
```

# BEISPIEL EINER AUSWERTUNG

RUN

\*\*\*\*\*  
 NON-LINEAR ESTIMATION FOR UNSTEADY-STATE OXYGEN TRANSFER  
 \*\*\*\*\*

BY  
 LINFIELD C. BROWN & GEORGE R. FISETTE  
 VERSION 1.0-NOVEMBER 11, 1979

IS DATA IN DISK FILE; Y/NPY  
 INPUT NAME OF DATA FILE?TEST2

ITERATION NUMBER	(C <sub>s</sub> )	DATA SET TEST2	KLA PRIME	SUM OF SQUARES
	C-STAR	C-ZERO (C <sub>o</sub> )		
0	10	.1	.07	.869733335
1	10.1592458	.713872799	.0601645437	.189522011
2	10.1889055	.694460338	.0603440105	.185289531
3	<u>10.1893432</u>	.694630637	<u>.0603354201</u>	.185289365

*min<sup>-1</sup>*

### STANDARD DEVIATIONS OF PARAMETER ESTIMATES

ABSOLUTE UNITS	.195594007	.111803446	3.18746727E-03
PERCENT OF LSE	1.91967633	16.0993277	5.28216013

ESTIMATE OF ERROR = .152187945

### SUMMARY OF DATA

	TIME	CONC	FIT VALUE	@ RESIDUAL
1	.77	1.25	1.12564889	.124351112
2	1.75	1.75	1.64603691	.103963087
3	2.67	2.05	2.10734213	-.0573421288
4	5.08	3	3.20108643	-.201086428
5	7.77	4.1	4.24803791	-.148037907
6	10.65	5.25	5.19571448	.0542855244
7	13.3	5.85	5.93358056	-.0835805573
8	17.88	7.1	6.96110108	.138898922
9	23.4	8.1	7.87555468	.224445321
10	34.52	8.9	9.00645823	-.106458228
11	49.13	9.65	9.69943839	-.0494383909

\*\*\*\*\*

ERGEBNISSE VON SAUERSTOFFEINTRAGSMESSUNGEN IN  
REINWASSER UND UNTER BETRIEBSBEDINGUNGEN

Fröse G.

1. EINLEITUNG

Im Rahmen eines Forschungsauftrages sowie gutachterlicher Tätigkeit haben wir in letzter Zeit auf technischen Anlagen zahlreiche Sauerstoffeintragungsmessungen sowohl in Reinwasser als auch unter Betriebsbedingungen durchgeführt. Unter dem zentralen Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit sollen die Ergebnisse dieser Messungen hier zusammenfassend dargestellt werden. Nach der prinzipiellen Wirkungsweise soll dabei grob unterschieden werden zwischen Druckluftsystemen, Oberflächenbelüftern und Ejektorbelüftern.

Druckluftsysteme sind dadurch gekennzeichnet, daß die Sauerstoffübertragung praktisch ausschließlich durch im Wasser aufsteigende Blasen erfolgt. In der Regel wird heute die feinblasige Druckbelüftung angewendet. Die Luft wird hierbei über poröse Filtermaterialien oder fein gelochte Folien in der Form von Rohren, Domen oder Platten am Beckenboden zugeführt. Mittel- und grobblasige Verfahren sind dagegen bedeutungslos geworden.

Bei Oberflächenbelüftern erfolgt der Sauerstoffübertrag im wesentlichen an Wassertropfen, die vom Belüfter durch die Luft geworfen werden und an der bewegten Wasseroberfläche. Der Sauerstoffeintrag durch Blasen, die in die Tiefe mitgerissen werden, ist vergleichsweise gering. Man unterscheidet zwischen Kreisel (vertikale Achse), Walzen bzw. Rotoren (horizontale Achse) und Wasserstrahlbelüftern (frei auf die Oberfläche fallender Strahl).

Ejektorbelüfter lassen sich dadurch charakterisieren, daß unter der Wasseroberfläche ein Wasserstrahl erzeugt und mit selbsttätig angesaugter oder extern komprimierter Luft innig vermischt wird. Technisch realisiert wird das Prinzip in relativ einfachen Aggregaten,



die das Wasser durch Tauchpumpen oder schnelllaufende Schnecken beschleunigen und Luft durch den entstehenden Unterdruck ansaugen sowie in Zweistoffdüsen mit getrennt steuerbarer Treibwasser- und Druckluftzufuhr. Von der Art der Sauerstoffübertragung entsprechen Ejektorbelüfter den Druckluftsystemen.

## 2. FEINBLASIGE DRUCKLUFTSYSTEME

Die feinblasigen Druckbelüftungssysteme lassen sich nach der Anordnung der Belüftungselemente sowie dem Vorhandensein zusätzlicher Mischaggregate weiter unterteilen in Systeme mit einseitig angeordneter Belüftung in langen, schmalen Becken (sog. Breitbandbelüftung), Systeme mit getrennter Umwälz- und Mischeinrichtung und Flächenbelüftungen.

### 2.1 Breitbandbelüftung

Auf einer Anlage mit Breitbandbelüftung wurde die Sauerstoffzufuhr unter Betriebsbedingungen gemessen. Der zugeordnete Sauerstofftrag betrug 1,1 kg/kWh. Dieser vergleichsweise niedrige Wert ist auf die verringerte Steigzeit der Luftblasen in der walzenförmigen Umwälzströmung (Abb. 1) erklären (Aufzugseffekt). Zusätzlich kommt es zu einer verstärkten Blasenkoaleszenz, da durch die Strömung der Blasen-schwarm eingeschnürt wird.

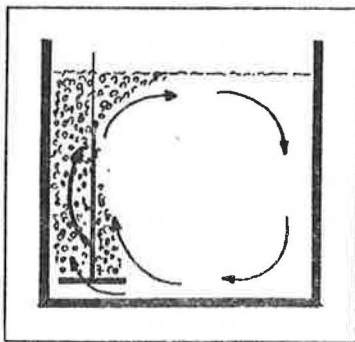


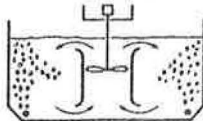
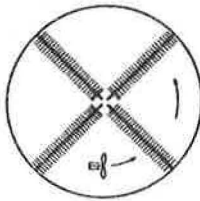
Abb. 1 : Breitbandbelüftung

## 2.2 Feinblasige Belüftung mit getrennter Umwälzung

Dieses System hat für schwachbelastete Belebungsanlagen weite Verbreitung gefunden, da hier die zur Sauerstoffversorgung notwendige Energie nicht ausreicht, um gleichzeitig eine vollständige Durchmischung des Beckeninhaltes zu gewährleisten. Durch die Form und Anordnung der Misch- und Umwälzeinrichtung wird darüber hinaus angestrebt, den bereits erwähnten Aufzugseffekt zu verhindern und damit eine Blasenverweilzeit wie in ruhendem Wasser zu erreichen.

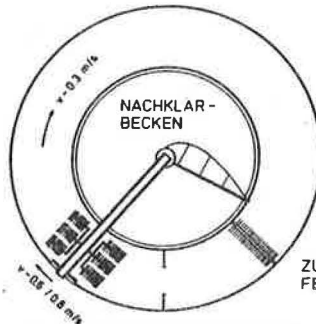
Von der Anzahl der untersuchten Anlagen her stellen die feinblasigen Druckluftsysteme mit getrennter Umwälzung die größte Gruppe im gesamten Untersuchungsprogramm. Die am Markt in nennenswertem Umfang vertretenen Systeme (Abb. 2) wurden praktisch vollständig und zum Teil in mehreren Anlagen unterschiedlicher Größe erfaßt.

UMWÄLZUNG MIT PROPELLER  
ODER ROTIERENDER BRÜCKE



VERTIKALE UMWÄLZUNG

BELÜFTUNG MIT DER BRÜCKE ROTIEREND



BEI BEDARF WEHR ZUR  
VERRINGERUNG DER GESCHWINDIGKEIT

Abb. 2 : Beispiele für Druckbelüftungssysteme mit getrennter Umwälzung

Die gemessenen Sauerstofferrträge sind nach der prozentualen Häufigkeit des Auftretens dargestellt (Abb. 3). Es ist eine relativ große Bandbreite von 1,0 bis 2,5 kg O<sub>2</sub>/kWh unter Betriebsbedingungen und 2,0 bis 3,2 kg O<sub>2</sub>/kWh in Reinwasser festzustellen. Da es sich nicht um gleiche Datenkollektive handelt, können Alpha-Werte aus dieser Abbildung nicht unmittelbar abgeleitet werden. In den Fällen, in denen korrespondierende Messungen in Reinwasser unter Betriebsbedingungen durchgeführt werden konnten, betragen die Alpha-Werte 0,5 bis 0,7. Die große Schwankungsbreite des Sauerstofferrtrages läßt sich zum Teil darauf zurückführen, daß die Leistungsaufnahmen als Brutto-Wirkleistung gemessen wurden und somit der unterschiedliche Wirkungsgrad der Gebläse das Ergebnis direkt beeinflußt. Ein weiterer Teil der Streuung wird durch von Fall zu Fall unterschiedliche Belüfterkerzenbeaufschlagung und die Kerzenanordnung verursacht.

### Druckluft mit getrennter Umwälzung

Häufigkeit [%]

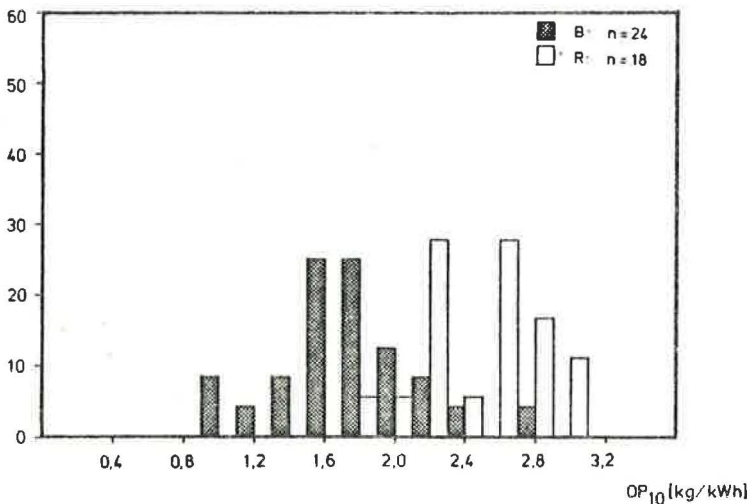


Abb. 3 : Sauerstofferrträge von Druckluftsystemen mit getrennter Umwälzung in Reinwasser (R) und unter Betriebsbedingungen (B)

Eine Auftragung der spezifischen Sauerstoffzufuhr  $OC_L$ , ET über der Kerzenbeaufschlagung (Abb. 4) zeigt - von einigen Ausnahmen abgesehen - eine starke Zunahme der spezifischen Sauerstoffzufuhr bei Kerzenbeaufschlagungen unter  $10 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{h}$ .

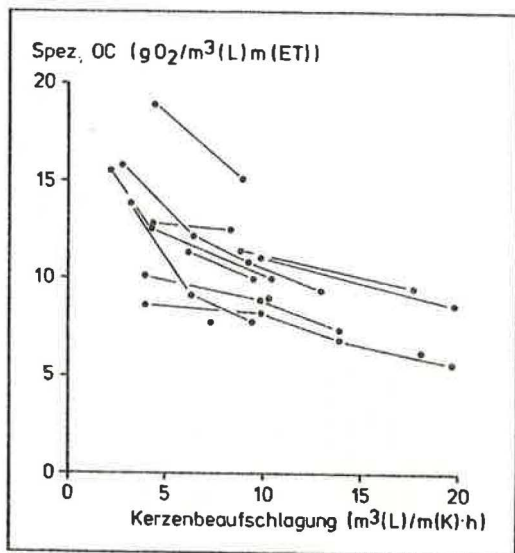


Abb. 4 : Kerzenbeaufschlagung und spezifische Sauerstoffzufuhr  
(Reinwasser) **BETRIEB**

Eine zu dichte Anordnung der Kerzen führt zur Ausbildung von Walzenströmung im Belüfterbereich. Wie bei der Breitbandbelüftung wird die Blasenverweilzeit verkürzt und die Wirtschaftlichkeit vermindert.

Von erheblichem Einfluß ist auch die Abstimmung zwischen Belüftung und Umwälzung. In einem hier untersuchten Fall wurden durch einen stark überdimensionierten Mischpropeller zwar günstige Sauerstoffeintragswerte erzielt, der Ertrag fiel jedoch insbesondere bei geringem Luftdurchsatz durch den proportional höheren Anteil der Umwälzenergie deutlich ab.

### 2.3 Flächenbelüftung

Die günstige Wirkung einer guten Blasenverteilung und einer geringen Belüfterbeaufschlagung läßt sich auch durch eine großflächige Belüftung - im Idealfall durch einen feingelochten Beckenboden - erzielen. In der Praxis werden Flächenbelüftungen mit rasterförmig angeordneten Domen, Rohrbelüftergittern bzw. mit folienbespannten Platten realisiert (Abb. 5). Die folienbespannte Platte kommt bei 100%iger Belegung des Beckenbodens dem Ideal der Flächenbelüftung am nächsten.

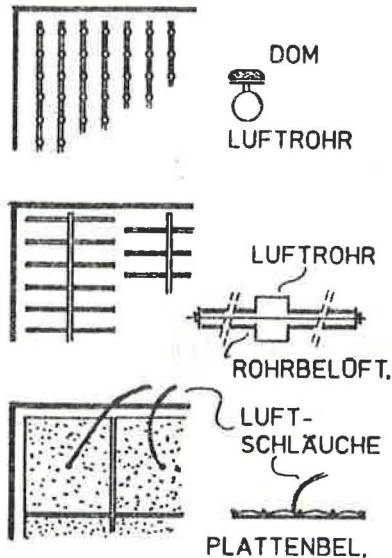


Abb. 5 : Flächenbelüftungssysteme

Sauerstoffeintragungsmessungen wurden an fünf mit verschiedenen Flächenbelüftungen ausgerüsteten Anlagen zum Teil in Reinwasser, zum Teil unter Betriebsbedingungen durchgeführt.

## Flächenbelüftung

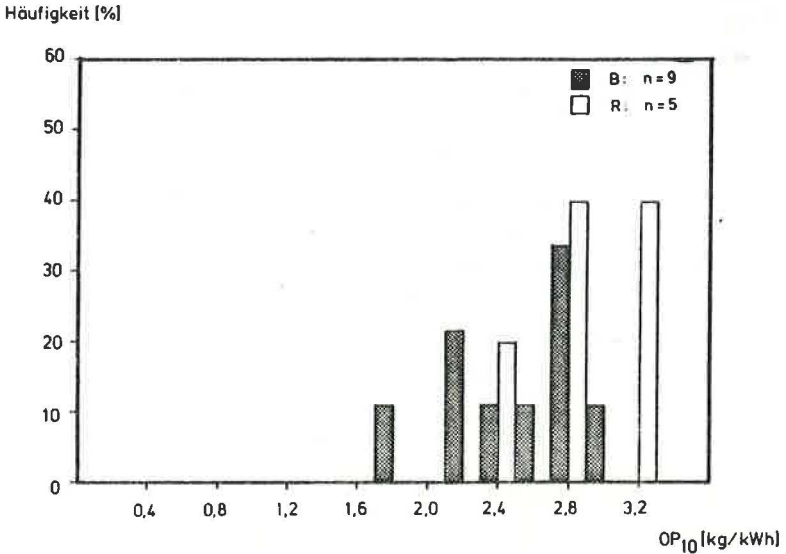


Abb. 6 : Sauerstofferträge von Flächenbelüftungen in Reinwasser (R) und unter Betriebsbedingungen (B)

Die Häufigkeitsdarstellung (Abb. 6) zeigt für diese Systeme sehr günstige Sauerstoffertragswerte zwischen 2,4 kg/kWh und 3,5 kg/kWh in Reinwasser sowie zwischen 1,7 kg/kWh und 2,8 kg/kWh unter Betriebsbedingungen. Ein  $\alpha$ -Wert läßt sich daraus nicht ablesen, da es sich nicht um korrespondierende Messungen handelt. Gestützt auf Meßergebnisse, die von dritter Seite in Reinwasser ermittelt wurden, läßt sich für einen Fall ein  $\alpha$  von 0,4 angeben. Ähnliche Resultate

ergaben sich auch aus eigenen Messungen an einer halbtechnischen Versuchsanlage.

### 3. EJEKTORBELOFTUNG

Ejektoren werden heute häufig bei der Reinigung industrieller Abwässer in tiefen Becken (Turmbiologie) eingesetzt. Ihre Vorteile bestehen darin, daß sie relativ verstopfungssicher sind und sehr kleine Blasen erzeugen können. In salzhaltigem Abwasser bleiben diese Blasen aufgrund der Koaleszenzhemmung erhalten, und es läßt sich bei großer Wassertiefe die Sauerstoffausnutzung und die Wirtschaftlichkeit steigern. Auch im Hinblick auf die Abluftbehandlung ist eine verbesserte Sauerstoffausnutzung vorteilhaft.

Wir haben Reinwasser-Messungen an einem 20 m tiefen Becken bei verschiedenen Fülltiefen durchgeführt und fanden den in Abb. 7 dargestellten Zusammenhang.

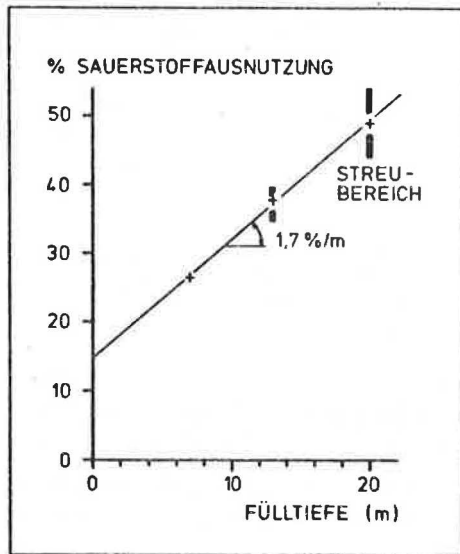


Abb. 7 : Sauerstoffausnutzung in Abhängigkeit von der Fülltiefe bei Ejektorbelüftung

Die Sauerstoffausnutzung steigt ausgehend von einem Sockelbetrag von rd. 15% um 1,7%/m entsprechend  $5 \text{ g O}_2/\text{m}^3$  Luft und m Einblastiefe. Diese Werte sind erstaunlich gering und vergleichbar mit einer grobbläsigen Belüftung. Es ist anzunehmen, daß nur im unteren Bereich des Beckens, in dem die vom Ejektor ausgestoßenen kleinen Blasen vorherrschen, ein intensiver Sauerstoffübergang stattfindet, darüber jedoch durch Koaleszenz große Blasen mit entsprechend verringertem Sauerstoffübergang entstehen.

Anzumerken ist, daß bei diesen Versuchen nur der Luftdurchsatz, nicht jedoch die Treibwassermenge verändert wurde. Korrigiert auf den Druck an der Düse erfolgten die Messungen mit Luft/Wasser-Verhältnissen von ca. 1 und 2 bei allen drei Fülltiefen. Der Energieanteil der Treibwasserpumpe betrug bei 7 m Fülltiefe 20-25%, bei 13,5 m ca. 15% und bei 20 m nur noch 5-8%. Der Sauerstofftrag nahm wegen des Sockelbetrages mit steigender Fülltiefe von 3,0 kg/kWh (7 m) über 2,4 kg/kWh (13,5 m) auf 2 kg/kWh (20 m) ab.

### 3.1 Selbstansaugende Ejektorbelüftung

Unter dem Begriff "selbstansaugende Ejektorbelüftung" sollen hier Systeme zusammengefaßt werden, in denen durch Tauchpumpen oder durch schnelllaufende Schnecken das Wasser beschleunigt und Luft durch den entstehenden Unterdruck selbsttätig angesaugt wird. Tauch-, Wendel- und Schraubenbelüfter gehören in diese Gruppe. Derartige Systeme werden in letzter Zeit häufig im Austausch gegen defekte Käfigwalzen und zur Teichbelüftung eingesetzt.

Durch die relativ einfache Konstruktion bieten insbesondere die Belüfter mit schnelllaufender Schnecke gewisse Vorteile im Hinblick auf die einfache Installation, Handhabung und Wartung. Da in den meisten Fällen mehrere Einheiten installiert werden, ist eine Abstufung des Sauerstoffeintrags durch Zu- und Abschalten einzelner Aggregate und damit eine relativ gute Anpassung an den jeweiligen Sauerstoffbedarf möglich.

An diesen Belüftern wurden insgesamt 29 Sauerstoffeintragungsmessungen unter Betriebsbedingungen auf 10 verschiedenen Belebungsanlagen durchgeführt. Vier verschiedene Schraubenbelüfterfabrikate und zwei



Tauchbelüfbertypen wurden dabei erfaßt. Die Häufigkeitsauftragung der Sauerstoffträge (Abb. 8) zeigt, daß von drei Ausnahmen abgesehen, ein Sauerstofftrag von 0,5 bis 0,7 kg O<sub>2</sub>/kWh unter Betriebsbedingungen erreicht wird.

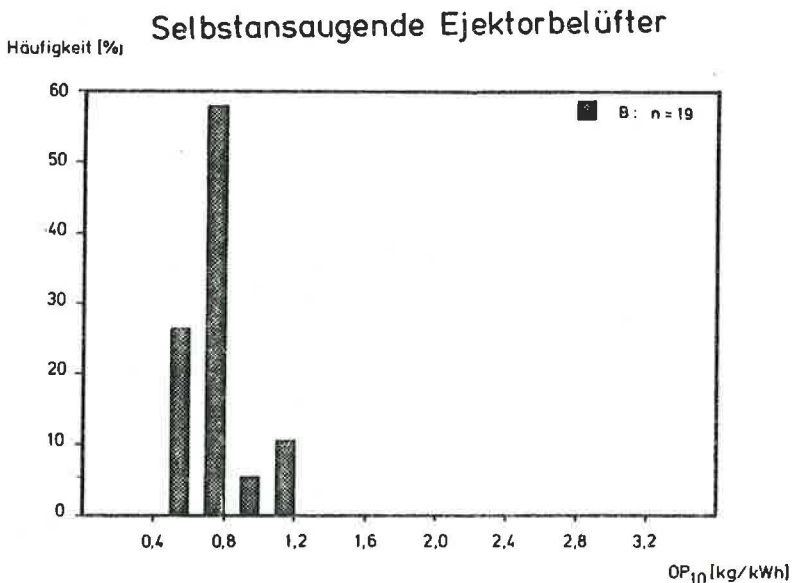


Abb. 8 : Sauerstoffträge von selbstansaugenden Ejektorbelüftern unter Betriebsbedingungen (B)

Man kann davon ausgehen, daß zwischen den einzelnen Fabriken keine gravierenden Unterschiede bestehen. Einflüsse aus der Beckengeometrie und der Anordnung der Aggregate sind weitaus größer einzuschätzen.

Dies wird deutlich an einem Fallbeispiel:

In einem ringförmigen Belebungsbecken wurden Versuche mit vier und mit zwei auf den Umfang verteilten Tauchbelüftern durchgeführt. Der Sauerstofftrag betrug mit zwei Einheiten 1,13 kg O<sub>2</sub>/kWh, mit vier Einheiten 0,63 kg O<sub>2</sub>/kWh. Der wesentlich schlechtere Wert bei Betrieb von vier Einheiten wird darauf zurückgeführt, daß jedes Aggregat in bereits sauerstoffangereichertem Wasser des vorangehenden arbeitete.

#### 4. OBERFLÄCHENBELOFTER

##### 4.1 Kreisel

An Kreiselbelüftern wurden zahlreiche Messungen im Auftrag der Stadt Hamburg durchgeführt. Im Rahmen des umfangreichsten Meßprogramms wurden verschiedene Fabrikate unter außerordentlich gut vergleichbaren Bedingungen in Reinwasser getestet. Die beiden Grundtypen des Kreisels, der geschlossene und der offene Kreisel, waren dabei vertreten. Geschlossene Kreisel saugen ähnlich wie Kreiselpumpen das Wasser von unten an und werfen radial aus. Offene Kreisel greifen direkt in die Wasseroberfläche und erzeugen neben einem - etwas schwächeren - vertikalen Sog auch eine Rundströmung (Abb. 9). Aufgrund dieser Eigenschaften eignen sich geschlossene Kreisel eher für tiefere Becken und Aggregate in offener Bauform für Beckenkonstruktionen, in denen eine horizontale Strömungskomponente erforderlich ist (Carrroussel).

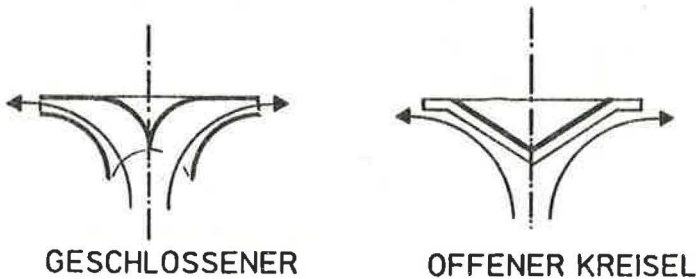


Abb. 9 : Kreiseltypen

Es wurde festgestellt, daß für jeden Kreiseltyp eine charakteristische Beziehung zwischen Drehzahl bzw. Leistungsaufnahme und Sauerstofftrag besteht. Aus Abb. 10 ist zu ersehen, daß die - ansonsten typische - Abnahme des Sauerstofftrags mit sinkender Leistungsaufnahme beim geschlossenen Kreisel stärker ausgeprägt ist als beim offenen. Dies sollte bei der Auslegung einer Sauerstoffeintragsregelung berücksichtigt werden.

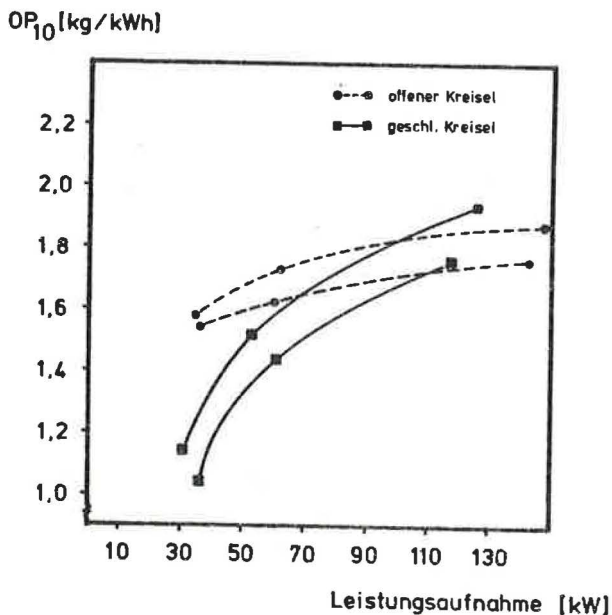


Abb. 10 : Zusammenhang zwischen Leistung und Sauerstofftrag bei verschiedenen Kreiseltypen

Weitere Messungen sowohl in Reinwasser als auch unter Betriebsbedingungen wurden auf dem Hamburger Klärwerk Köhlbrandhöft sowie auf einigen kleineren Anlagen durchgeführt. Bei den Versuchen auf Köhlbrandhöft wurde festgestellt, daß der Sauerstoffeintrag durch Stützen, die als Kreiselaufleger dienen, stark beeinträchtigt

wird. Offenbar bildet sich innerhalb der vier, an den Eckpunkten eines Quadrates (Seitenlänge 4,60 m) aufgestellten Rundstützen eine vom außen liegenden Bereich getrennte Strömung aus. Der Austausch zwischen innerer und äußerer Beckenzone wird dadurch erheblich behindert.

Faßt man die an Kreisel gemessenen Sauerstoffträge zusammen, ergibt sich die in Abb. 11 dargestellte Häufigkeitsverteilung. Anzumerken ist, daß die meisten Reinwassermessungen an relativ modernen Konstruktionen, die Messungen unter Betriebsbedingungen dagegen an Kreiseln älterer Bauart bzw. in Becken mit problematischer Hydraulik durchgeführt wurden. Das Verhältnis zwischen den Ergebnissen in Reinwasser und unter Betriebsbedingungen erscheint deshalb - abgesehen davon, daß es sich auch hier nicht um gleiche Datenkollektive handelt - verzerrt.

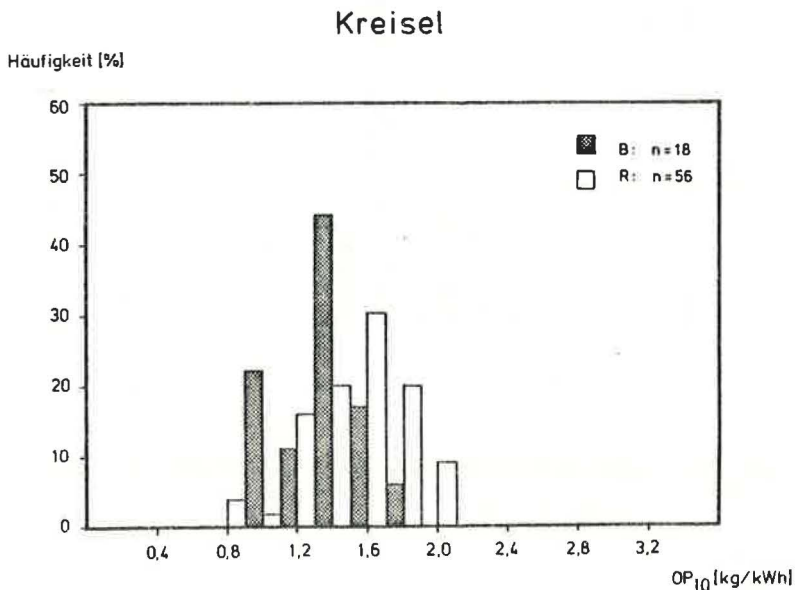


Abb. 11 : Sauerstoffträge von Kreiseln in Reinwasser (R) und unter Betriebsbedingungen (B)

#### 4.2 Walzen und Rotoren

Walzen- bzw. Rotorbelüfter haben als Kessener Bürsten ( $\varnothing$  50 cm) in hochbelasteten Belebungsanlagen, als Käfigwalzen ( $\varnothing$  70 cm) in Oxidationsgräben und als Mammutrotoren ( $\varnothing$  1,0 m) in Umlaufbecken weite Verbreitung gefunden. In Neuanlagen wird allerdings heute fast ausschließlich der Mammutrotor eingesetzt.

Meßergebnisse liegen vor von drei Anlagen mit Mammutrotoren und einem Oxidationsgraben mit Käfigwalzen. In allen Fällen handelt es sich um Messungen unter Betriebsbedingungen.

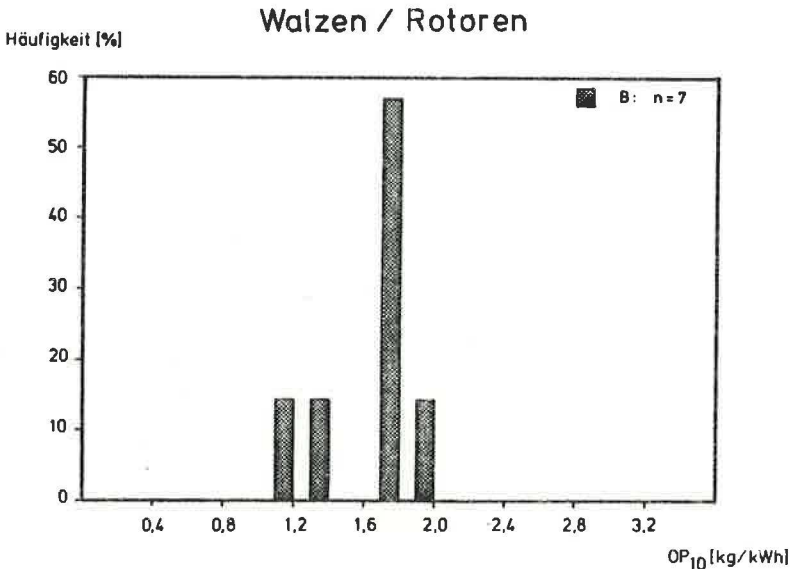


Abb. 12 : Sauerstofftrag von Rotoren / Walzen unter Betriebsbedingungen (B)

Die Sauerstoffträge liegen nach Abb. 12 zwischen 1,1 kg O<sub>2</sub>/kWh und 2,0 kg O<sub>2</sub>/kWh, wobei die geringeren Werte der Käfigwalze zuzuordnen sind. Die Wirtschaftlichkeit der Mammutrotoren ist in ge-

wissem Maße von der Zahl der betriebenen Aggregate abhängig, da mit steigender Rotorzahl die Fließgeschwindigkeit zunimmt, das sauerstoffangereicherte Wasser schneller zum nächsten Rotor gelangt und das Sättigungsdefizit damit verringert wird.

### 5. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Vergleicht man die Ergebnisse der hier untersuchten Belüftungssysteme, so läßt sich eine relativ große Spanne unterschiedlicher Sauerstoff-erträge feststellen. Am unteren Ende der Skala befinden sich die selbstansaugenden Ejektorbelüfter mit Erträgen von 0,6 bis 0,8 kg Sauerstoff pro kWh unter Betriebsbedingungen, am oberen Ende die Flächenbelüftung mit 2,0 bis 2,8 kg O<sub>2</sub>/kWh ebenfalls unter Betriebsbedingungen. Im Mittelfeld sind moderne Oberflächenbelüfter und Druckluftsysteme mit getrennter Umwälzung vom Energieaufwand her als gleich anzusehen. Unter Betriebsbedingungen beträgt der Sauerstoff-ertrag dieser hier zahlreich untersuchten Belüftungssysteme ca. 1,5-1,8 kg O<sub>2</sub>/kWh, in Einzelfällen bei besonders günstiger Abstimmung und Anordnung des Systems bis ca. 2,0 kg O<sub>2</sub>/kWh.

Bei einer Bewertung dieser Zahlen muß jedoch berücksichtigt werden, daß im praktischen Betrieb der Sauerstoff-ertrag von vielen Faktoren beeinflußt wird. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die Regelbarkeit des Systems bzw. die Anpassbarkeit des Sauerstoffeintrags an den jeweiligen Bedarf. Bei Druckluftsystemen sind mögliche Verschlechterungen durch Kerzenverstopfung zu berücksichtigen. Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit ist darüberhinaus der Wartungsaufwand eine wesentliche Einflußgröße. Berücksichtigt man diesen Aspekt, so sind die einfachen Systeme wie z.B. selbstansaugende Ejektorbelüfter günstiger einzustufen als allein aufgrund ihrer - geringen - Sauerstoff-erträge.

Hinsichtlich der Konstruktion und Auslegung von Becken und Belüftungssystemen konnte an einigen Beispielen demonstriert werden, daß auch der Beckengeometrie und der Abstimmung einzelner Systemkomponenten aufeinander große Bedeutung zukommt.

Ein Belüftungssystem sollte im Einzelfall deshalb nicht allein aufgrund der - in Prospekten ohnehin oft stark übertriebenen - Sauerstoffträge, sondern mit Blick auf das Gesamtsystem "Belebungsbecken" und nach Abwägung einer größeren Zahl von Einflußfaktoren gewählt werden.

FRÖSE Gero, Dipl.-Ing.  
Technische Universität Braunschweig  
Inst. f. Stadtbauwesen, Abt. Siedlungswasserwirtschaft  
Postfach 3329  
D-3300 Braunschweig

ERGEBNISSE VON SAUERSTOFFZUFUHRVERSUCHEN  
MIT VERSCHIEDENEN BELUEFTUNGSSYSTEMEN

J. Koral

1. ALLGEMEINES

Dieser Beitrag basiert vor allem auf Erfahrungen aus der Schweiz, insbesondere aus dem Kanton Zürich.

2. SAUERSTOFFZUFUHRVERSUCHE

Die Sauerstoffzufuhrversuche werden in der Schweiz von privaten sowie von staatlichen Institutionen (Bund, Kantone) durchgeführt. Das Amt für Gewässerschutz des Kantons Zürich führt Sauerstoffzufuhrversuche unter Standardbedingungen (im Reinwasser) sowie unter Betriebsbedingungen (im Belebtschlamm) durch. Pro Garantiewert werden grundsätzlich zwei gleiche Versuche mit je 2 Sauerstoffkurven (4 x Sauerstoffkurven pro Garantiewert) durchgeführt.

2.1 Sauerstoffzufuhrversuche unter Standardbedingungen

Die Durchführung sowie Auswertung der Sauerstoffzufuhrversuche stimmt grundsätzlich mit der (ÖNORM, 1979) überein.

Zur Sauerstoffbindung wird Natriumbisulfit in flüssiger Form ( $\text{NaHSO}_3$ ; 24%  $\text{SO}_2$ ) angewendet. Da das Natriumbisulfit den pH-Wert des Wassers senkt und somit die chemische Reaktion der Sauerstoffbindung verlangsamt, muss bei weichem und kaltem Wasser sowie bei mehreren Versuchen der pH-Wert mit Natronlauge ( $\text{NaOH}$ , 30%) korrigiert werden.

In jede Wasserfüllung wird einmalig Kobaltchlorid ( $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ; 24 % Co) in einer Menge von 0,5 g Kobalt pro  $\text{m}^3$  Wasser zugegeben. Diese Menge entspricht dem schweizerischen Grenzwert für Einleitungen in ein Gewässer (VERORDNUNG, 1975)



sowie den Empfehlungen (ATV,1979). Sie ist jedoch kleiner als die Angabe in (ÖNORM,1979). Die Literaturangaben betreffend Kobaltzugabe gehen leider weitgehend auseinander.

Das Durchmischen von Natriumbisulfit erfolgt bei feinblasigen Belüftungen mit einem Flygt Tauchmotor-Rührwerk 4350 (Leistung  $\approx$  1 kW) sowie durch mehrmaliges kurzfristiges Einschalten der Belüftung. Das letztere wird so lange fortgesetzt, bis alle überschüssigen Chemikalien verbraucht sind. Mit dem kleinen Tauchmotor-Rührwerk kann erfahrungsgemäss ein Becken 24 x 24 x 4 m durchgemischt werden.

Bei abgestellter Belüftung darf während der Mischung von Chemikalien kein Wasser in die feinblasigen Belüfter und in die Luftleitungen eindringen. Dieses kann z.B. durch geringfügige Luftzufuhr gewährleistet werden.

Der Sauerstoffgehalt wird in zwei Punkten mit Sauerstoffsonden mit Rührer gemessen. Die Sauerstoffsonden werden bei Längsbecken in 1/4 und 3/4 der Länge ungefähr in mittlerer Tiefe platziert. Sie arbeiten auch zuverlässig in Bereichen mit aufsteigenden Luftblasen. Der vibrierende Rührer der Sauerstoffsonde verhindert, dass Luftblasen zur Membrane der Sauerstoffsonde gelangen. Vergleichsversuche mit feinblasiger Flächenbelüftung, bei denen die Sauerstoffsonden in und ausserhalb des Blasenbereichs platziert wurden, zeigten keine Unterschiede in der Sauerstoffzufuhr.

Die Leistungsaufnahme wird grundsätzlich mit kW-Zählern ermittelt. Falls kein separater kW-Zähler für die Belüftung vorhanden ist, wird ein kW-Zähler geliehen und provisorisch installiert. Bestimmung der Leistungsaufnahme auf Grund von gemessenen Volt, Ampère und  $\cos \varphi$  hat sich weniger gut bewährt.

Die angesaugte Luftmenge kann aus dem Leistungsdiagramm des

Gebläses ermittelt werden. Die Drehzahl des Gebläses wird dabei mit einem elektronischen Umdrehungszähler gemessen. Die Toleranzen der Gebläse betragen etwa  $\pm 5\%$ . Da die Leistung jedes Gebläses auf dem Prüfstand der Lieferfirma normalerweise mindestens in einem Punkt überprüft wird, kann die Genauigkeit der Luftmengenbestimmung durch Berücksichtigung der Ergebnisse dieser Prüfung zusätzlich erhöht werden.

Direkte Luftmengenmessungen in Druck- bzw. Saugleitungen können zuverlässig in breiten Messbereichen mit geeichten Mengengaszählern durchgeführt werden. Unter Berücksichtigung der Eichkurve können zuverlässig Genauigkeiten unter 2 % erreicht werden.

Die Ermittlung der Luftmengen mit Blenden, Annubar-Sonden etc. ist in der Regel für Sauerstoffzufuhrversuche wenig genau und darum ungeeignet.

Zur Ermittlung der Druckverluste in feinblasigen Belüftern muss der Druck in der Druckleitung genau gemessen werden. Ein einfacher U-Manometer aus einem durchsichtigen Plastikschlauch (Höhe etwa 5 m) der an einer hölzernen Latte befestigt ist, hat sich gut bewährt.

Die Erhöhung der Sauerstoffsättigung durch die Einblastiefe wurde bei feinblasigen Flächenbelüftungen wie folgt ermittelt: Ein im Versuchsbecken eingetauchter Behälter wurde mit einem Aquariumstein belüftet. Am Ende des Versuches wurden dann die Sauerstoffsättigungen im Becken und im Behälter verglichen. Nach diesen Messungen liegt der Schwerpunkt der Sauerstoffzufuhr bei feinblasigen Flächenbelüftungen in einer Wassertiefe von etwa  $0,45 \times$  Einblastiefe. Die einfache rechnerische Berücksichtigung der Einblastiefe nach (ÖNORM, 1979) mit der Formel  $( 1 + \frac{ET}{20,7} )$  ergibt nach diesen Messungen etwas höhere Werte (etwa 1,5% bei 3,5 m Einblastiefe). Die geringfügige Abweichung ist vernachlässigbar.

Die Auswertung der Sauerstoffkurven wird mit einem Rechner durchgeführt. Das Programm basiert auf dem Programm von (STENSTROM, 1981) welches nachträglich modifiziert und verbessert wurde. Prinzip der Programmberechnung: Optimierung einer Exponentialkurve nach Taylor Reihenentwicklung.

## 2.2 Sauerstoffzufuhrversuche unter Betriebsbedingungen

Die Sauerstoffmessung und Registrierung, die Ermittlung der Leistungsaufnahme sowie der Luftmengen ist identisch mit den Reinwasserversuchen. Die Sauerstoffmessung erfolgt jedoch zum Unterschied zu Reinwasserversuchen nicht in relativen, sondern in absoluten Werten ( $\text{gO}_2/\text{m}^3$ ). Zusätzlich werden folgende Werte ermittelt: die Zehrung des Belebtschlammes der  $\beta$ -Wert, die Beschaffenheit des Belebtschlammes (Trockensubstanz, Absetzvolumen, Oberflächenspannung).

Der Sauerstoffgehalt des Belebtschlammes wird vor den Versuchen entweder durch Zehrung des Belebtschlammes gegen Null gesenkt vgl. (KAYSER, 1967) oder mit Wasserstoffperoxid nach (KAYSER, 1982) erhöht. Die Einrichtung zur Dosierung von Wasserstoffperoxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ist relativ einfach. Sie besteht aus acht Plastikbehältern (etwa 10 l) von denen jeder mit einem Plastikschauch mit Kugelventil versehen ist. Das Ende des etwa 5 m langen Schlauches wird mit Seilen und Gewicht im Becken fixiert. Die Behälter werden vor dem Versuch mit der berechneten Menge von Wasserstoffperoxid gefüllt. Die Kugelventile werden dann möglichst gleichzeitig bei laufender Belüftung geöffnet.

Vergleichsversuche mit und ohne Wasserstoffperoxid haben gleiche Resultate ergeben und somit ein weiteres Mal die Theorie (KAYSER, 1982) bestätigt.

Die Auswertung der Sauerstoffeintragsversuche im Belebtschlamm erfolgte früher grundsätzlich nach (KAYSER, 1967). Bei den letzten Versuchen wurde ein etwas unterschiedliches Verfahren

gewählt. Während der Versuche wurde der  $\beta$ -Wert ermittelt und die Auswertung wurde dann identisch mit den Reinwasserversuchen, unter Berücksichtigung des ermittelten  $\beta$ -wertes, durchgeführt.

### 3. RESULTATE DER SAUERSTOFFZUFUHRVERSUCHE

Die Resultate von Sauerstoffzufuhrversuchen des Amtes für Gewässerschutz und Wasserbau des Kantons Zürich von ausgewählten Kläranlagen sowie die wichtigsten Angaben über die Belüftungseinrichtungen sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Da jede Kläranlage ihre eigenen Gegebenheiten besitzt und Belüftungen ständig verbessert werden, sind die Resultate nicht vorbehaltlos übertragbar.

Tabelle der Resultate der Sauerstoffeintragsversuche

Legende: B = Breite des Versuchsbeckens L = Länge des Versuchsbeckens  
 BF = Belüftungsfläche QL = Luftmenge, Ansaugvolumen  
 ET = Einblastiefe QL = spezifische Luftmenge  
 I = Wasserinhalt T = Wassertiefe  
 VB = Versuchsbecken

Kläranlage	Datum Medium Höhe ü.M.	Belüftung	Versuchsbecken		Luftmengen		Leistungs- aufnahme		Sauerstoffzufuhr			O <sub>2</sub> - Ertrag	α - Wert
					Q <sub>L</sub>	q <sub>L</sub>	kW	W m <sup>3</sup> VB	gO <sub>2</sub> h·m <sup>3</sup> VB	kgO <sub>2</sub> h	pro l m		
					m <sup>3</sup> h	m <sup>3</sup> h·m <sup>2</sup> BF					ET		
									gO <sub>2</sub> m <sup>3</sup> ·m	kgO <sub>2</sub> kWh			
<u>Feinblasige Flächenbelüftung</u>													
A	9.84 Reinw. 400 m	Feinblasige Flä- chenbel. mit ke- ramischen Domen D=178mm; 420 St. BF=10,45 m <sup>2</sup>	B=12,5 m	I=647 m <sup>3</sup>	1441	138	27,4	42	150	97,3	17,1	3,7	
			L=12,5 m		631	61	12,0	19	71	45,8	18,4	3,9	
			T=4,25 m	ET=3,95 m	267	26	5,1	8	33	21,3	20,2	4,3	
					96	9	1,8	2,8	14	9,25	24,4	5,2 *	
	9.84 Reinw. 400 m	Feinblasige Flä- chenbel. mit ke- ramischen Domen D=178mm; 312 St. BF=7,76 m <sup>2</sup>	B=12,5 m	I=1333m <sup>3</sup>	1875	242	35,6	27	73	97,7	13,2	2,8	
			L=25,4 m		1071	138	20,4	15	45	60,0	14,2	3,0	
			T=4,25 m	ET=3,95 m	458	59	8,7	6,5	24	32,0	17,7	3,8	
					234	30	4,4	3,3	14	18,5	20,0	4,3	
					128	16	2,43	1,8	9	11,5	22,9	4,9*	
B	5.84 Reinw. 440 m	Feinblasige Flä- chenbel. mit ke- ramischen Domen D=178mm; 168 St. BF=4,18 m <sup>2</sup>	B=7,42 m	I=129 m <sup>3</sup>	864	207	13,9	108	196	25,3	13,7	1,8	
			L=7,42 m		624	149	8,6	67	147	18,9	14,2	2,2	
			T=2,42 m	ET=2,13 m	258	62	3,3	26	74	9,5	17,3	2,9	

\* Der hohe Sauerstoffertag ist auf die geringe Belastung der Belüfter unterhalb des Betriebsbereiches (9 bzw. 16 m<sup>3</sup>/h·m<sup>2</sup> BF) sowie auf den guten Wirkungsgrad der Turboverdichter zurückzuführen.



C	5.82 Reinw. 410 m	Feinblasige Flächenbel. mit keramischen Domen D=178mm; 312 St. BF=7,76 m <sup>2</sup>	B= 4,0 m L=33,3 m T=3,88 m	I=504 m <sup>3</sup> EI=3,63 m	1236 780 486	159 101 63	22,9 14,5 9,1	45 29 18	131 85 55	66,18 42,9 27,76	14,8 15,1 15,7	2,9 3,0 3,1	
	6.82 Bel.Schl. 410 m	do	do	do	1236 486	159 63	- -	- -	85 36	43,1 17,9	9,7 10,0	- -	0,65 0,65
D	9.85 Reinw. 420 m	Feinblasige Flächenbel. mit keramischen Tellern D=270mm; 432 St. BF=17,95 m <sup>2</sup>	B= 3,5 m L=2x28 m T=3,42 m	I=629 m <sup>3</sup> EI=3,14 m	2044 708	114 39	30,43 10,67	48 17	145 57	91,4 36,0	14,3 16,2	3,0 3,4	- -
E	12.82 Reinw. 515 m	Feinblasige Flächenbel. mit keramischen Tellern D=230mm; 368 St. BF=15,29 m <sup>2</sup>	B= 3,5 m L=2x30 m T=3,60 m	I=387 m <sup>3</sup> EI=3,34 m	1368 684	89 45	23,0 11,3	59 29	174 106	67,3 41,1	14,7 18,0	2,9 3,6	- -
F	6.85 Reinw. 410 m	Feinblasige Flächenbel. mit Kunststofftellern D=178mm; 260 St. BF=6,47 m <sup>2</sup>	B= 5,0 m L=25,5 m T=3,88 m	I=484 m <sup>3</sup> EI=3,65 m	1374 858	212 133	22,7 13,9	47 29	133 87	64,3 41,9	12,8 13,4	2,8 3,0	-
G	4.81 Reinw. 410 m	Feinblasige Flächenbel. mit Kunststofftellern D=178mm; 500 St. BF=12,44 m <sup>2</sup>	B= 4,0 m L=42 m T=3,89 m	I=610 m <sup>3</sup> EI=3,66 m	2140 840	172 68	38,1 17,0	62 28	177 68	107,8 41,69	13,8 13,6	2,8 2,5	- -
	9.82 Bel.Schl. 410 m	do	B= 4,0 m L=42 m T=3,95 m	I=617 m <sup>3</sup> EI=3,72 m	2140 840	172 68	39,9 17,7	65 29	103 40	63,6 24,5	8,0 7,8	1,6 1,4	0,58 0,58

Kläranlage	Datum Medium Höhe ü.M.	Belüftung	Versuchsbecken		Luftmengen		Leistungs- aufnahme		Sauerstoffzufuhr			O <sub>2</sub> - Ertrag	α - Wert
					Q <sub>L</sub>	q <sub>L</sub>	kW	W m <sup>3</sup> VB	gO <sub>2</sub> h·m <sup>3</sup> VB	kgO <sub>2</sub> h	pro l m ET gO <sub>2</sub> m <sup>3</sup> ·m		
					$\frac{m^3}{h}$	$\frac{m^3}{h \cdot m^2 BF}$							
<u>Feinblasige Flächenbelüftung / Bandbelüftung</u>													
H	3.85 Reinw. 620 m	Feinblasige Plat- tenbel. mit Kunst- stoffolie BF=64 m <sup>2</sup>	B= 3,80 m	I=296 m <sup>3</sup>	646	10,1	13,3	45	155	46,1	22,2	3,5	-
			L=25 m		468	7,3	10,0	34	123	36,3	24,1	3,6	-
			T= 3,28 m	ET=3,22 m	277	4,3	6,9	23	77	22,7	25,5	3,3	-
					132	2,1	4,9	17	36	10,7	25,3	2,2*	-
	9.85 Bel.Schl. 620 m	do	B= 3,80 m	I=299 m <sup>3</sup>	654	10,2	13,4	45	125	37,3	17,5	2,8	0,79
			L=25 m		473	7,4	10,2	34	86	25,7	16,6	2,5	0,69
			T= 3,32 m	ET=3,26 m	271	4,2	7,0	23	49	14,6	16,5	2,1	0,65
					133	2,1	4,9	16	23	6,8	15,7	1,4	0,62
I	10.77 Reinw. 420 m	Feinblasige Band- bel. mit kerami- schen Domen D=178mm; 552 St. BF=13,74 m <sup>2</sup>	B= 4,4 m	I=608 m <sup>3</sup>	1720	125	32,5	53	132	80,0	12,7	2,5	-
			L=35 m		1010	74	18,3	30	82	50,1	13,5	2,7	-
			T= 3,95 m	ET=3,67 m	600	44	10,8	18	51	31,2	14,2	2,9	-
K	5.85 Reinw. 462 m	Feinblasige Band- bel. mit kerami- schen Rohren D/I=70/600mm 282 St. BF=37,21 m <sup>2</sup>	B= 6,5 m	I=1317m <sup>3</sup>	2190	59	39,3	30	69	90,7	10,5	2,3	-
			L=48 m		835	22	14,7	11	28	36,5	11,1	2,5	-
			T= 4,44 m	ET=3,94 m									

\* Der relativ schlechte Sauerstoffertag ist vor allem auf den niedrigen gesamten Wirkungsgrad des Druckluftaggregates bei kleinen Luftmengen (Frequenzumwandler, Gebläse, Elektromotor, vgl. Abs. 7) zurückzuführen.

L	11.80 Reinw. 407 m	Feinblasige Band- bel. mit kerami- schen Rohren D/L=70/600mm 220 St. BF=29,03 m <sup>2</sup>	B= 4,1 m L=40 m T= 3,9 m	I=647m <sup>3</sup> EI=3,4 m	3860 1200	133 41	75,6 26,6	117 41	212 76	137,1 49,0	10,5 11,8	1,8 1,8	
	M	11.77 Reinw. 440	Feinblasige Band- bel. mit kerami- schen Rohren D/L=70/600mm 704 St. BF=92,86 m <sup>2</sup>	B= 8,00 m L=32 m T= 4,26 m	I= 2050m <sup>3</sup> EI=3,76m	8000 6000 4000	86 65 43	142 102 66	70 50 32	203 147 110	415,5 301,9 224,6	13,8 13,4 14,9	2,9 3,0 3,4
N		7.77 Reinw. 420 m	Feinblasige Band- bel. mit kerami- schen Rohren D/L=50/460mm 108 St. BF=7,8 m <sup>2</sup>	B= 5,25 m L=24,0 m T= 3,9 m	I=470m <sup>3</sup> EI=3,7m	1540 1210 440	197 155 56	30,6 25,6 9,9	65 54 21	107 96 45	50,3 45,1 21,0	8,9 10,2 13,0	1,7 1,8 2,1
	O	3.76 Reinw. 415 m	Feinblasige Band- bel. mit kerami- schen Rohren D/L=50/480mm 24 St., BF=1,81 m <sup>2</sup>	B= 3,65 m L=10,0 m T=2,6 m	I=89,4m <sup>3</sup> EI=2,3m	360 240 95	199 133 53	4,5 3,6 1,5	50 40 17	92 69 37	8,26 6,13 3,35	10,0 11,1 15,3	1,84 1,72 2,20
			m. Kunststoff- rohren D/L=50/480 mm			360 240 95	199 133 53	4,5 3,6 1,5	50 40 17	98 65 37	8,72 5,81 3,28	10,5 10,5 15,0	1,92 1,61 2,19

\* Vergleichsversuche mit keramischen Rohren und Kunststoffrohren haben gezeigt, dass die Sauerstoffzufuhr bei neuen Belüftern im Reinwasser annähernd gleich ist.



Kläranlage	Datum Medium Höhe ü.M.	Belüftung	Versuchsbecken		Luftmengen		Leistungs- aufnahme		Sauerstoffzufuhr			O <sub>2</sub> - Ertrag	α - Wert	
					Q <sub>L</sub>	q <sub>L</sub>	kW	W m <sup>3</sup> VB	gO <sub>2</sub> h·m <sup>3</sup> VB	kgO <sub>2</sub> h	pro l m ET gO <sub>2</sub> m <sup>3</sup> ·m			kgO <sub>2</sub> kWh
					m <sup>3</sup> h	m <sup>3</sup> h·m <sup>2</sup> BF								
<u>Feinblasige Bandbelüftung</u>														
P	8.79 Reinw. 410 m	Feinblasige Band- bel. mit Kunst- stoffrohren D/L=50/480mm 126 St. BF=9,50 m <sup>2</sup>	B= 4,2 m L=33 m T= 4,75 m	I=554m <sup>3</sup> ET=4,06m	1512 864	159 91	31,0 19,5	56 35	100 69	55,3 38,2	9,1 10,8	1,8 2,0		
R	11.76 Reinw. 550 m	do D/L=50/480mm 140 St. BF=10,56 m <sup>2</sup>	B= 7,65 m L=22,0 m T= 3,72 m	I=610m <sup>3</sup> ET=3,47m	1743 1130 613	165 107 58	29,5 17,6 11,8	48 29 19	93 66 45	56,8 40,31 27,15	9,4 10,3 12,7	1,93 2,29 2,30		
<u>Feinblasige Gegenstrombelüftung</u>														
S	7.77 Reinw. 420 m	Feinblasige Gegen- strombel. mit ke- ramischen Rohren D/L=70/500mm 280 St. BF=30,80 m <sup>2</sup>	Ringbecken B= 2,8 m T= 2,95	I=605m <sup>3</sup> ET=2,6m	1536 1038 498	50 34 16	20,37 13,1 7,8	34 22 13	82,8 61,0 28,6	50,1 36,9 17,3	12,54 13,7 13,3	2,46 2,83 2,22		
T	11.76 Reinw. 630 m	Feinblasige Gegen- strombel. mit ke- ramischen Rohren D/L=70/500mm 120 St. BF=13,19 m <sup>2</sup>	Ringbecken B= 4,75 m T= 3,0 m	I=856m <sup>3</sup> ET=2,63m	610 240	46 18	11,7 5,0	14 6	34 16	28,8 13,8	17,9 21,9	2,45 2,77		

U	10.76 Reinw. 430 m	Feinblasige Gegenstrombel. mit keramischen Rohren D/L=70/500mm 216 St. BF=23,75 m <sup>2</sup>	Ringbecken B= 2,7 m T= 2,6 m	I=511m <sup>3</sup> ET=2,35m	1485 735 320	63 31 13	24,4 11,3 5,6	48 22 11	91 65 38	46,6 33,4 19,5	13,4 19,3 25,9	1,91 2,95 3,48
<u>Oberflächenbelüftung</u>												
V	7.77 Reinw. 430 m	Oberflächenbel. mit Mammutrotoren 2 St. D=1,0 m, L=3,0 m	Ringbecken B= 3,8 m T=2,0-2,12m	I=617- 654m <sup>3</sup>			28,90 16,13 9,02	44 25 15	83 46 33	54,5 30,1 20,1	- - -	1,9 1,9 2,2
W	12.79 Reinw. 200 m	Oberflächenbel. mit Turbinen 2 St. D=1,6 und 2,0 m	B=10,2 m L=20,4 m T= 3,45 m	I=710m <sup>3</sup>			45,2 13,6	64 19	136 31	97,1 21,9	- -	2,15 1,6
Z	10.76 Reinw. 445 m	Oberflächenbel. mit Turbinen 1 St. D=2,0 m	B=15,0 m L=16,5 m T= 3,46 m	I=806- 835m <sup>3</sup>			29,6 23,1 8,6	35 29 11	62 62 19	52,1 49,9 15,5	- - -	1,8 2,2 1,8
<u>Tiefenbelüftung</u>												
B	11.82 Bel.Schl 440 m	Tiefenbel. rotier. Scheibe D=0,15 m 2900 U/min 4 St.	B= 7,42 m L= 7,42 m T= 2,43 m	I=130m <sup>3</sup> ET=1,93m	156,6 78,3		13,6 6,6	105 51	26 15	3,4 2,0	11,5 13,5	0,25* 0,31

\* Vier Schlammblüfter wurden versuchsweise in das Belüftungsbecken installiert, um deren Wirtschaftlichkeit zu prüfen. Der Sauerstofftrag ist sehr gering. Diese Resultate sind nicht auf andere, ähnliche Belüftungen übertragbar.

#### 4. GARANTIEBESTIMMUNGEN

Leistungsgarantien sind vor allem bei grösseren Kläranlagen, bei weniger bekannten Belüftungssystemen sowie bei unglaublichen Angaben der Lieferfirma zu verlangen. Vergleiche von Offerten bzw. von Projektvarianten sind oft nur auf Grund von garantierten Werten zuverlässig möglich.

Bestandteile einer Garantie:

- Die Sauerstoffzufuhr unter Standard- bzw. unter Betriebsbedingungen (  $\text{kgO}_2/\text{h}$  ).

Es sind mindestens zwei Betriebspunkte (Max. und Min.) anzugeben.

- Der Sauerstoffertrag (  $\text{kgO}_2/\text{kWh}$  )

Bei Druckluftbelüftungen kann anstelle des Sauerstoffertrags die spezifische Sauerstoffzufuhr pro 1 m Einblas-tiefe (  $\text{gO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{m}$  ) vor allem in folgenden Fällen angegeben werden:

- Der Lieferant der Belüftung ist mit dem Lieferanten der Druckluftaggregate nicht identisch.
- Die tatsächliche Leistungsaufnahme der Druckluftaggregate kann während der Sauerstoffzufuhrversuche nicht ermittelt werden.

- Die Toleranz der Durchführung und Auswertung der Sauerstoffzufuhrversuche ist anzugeben (z.B.  $\pm 7\%$  auf den mittleren Sauerstoffertrag und auf die max. Sauerstoffzufuhr).

Die Garantiewerte der Lieferfirma sollten ohne Toleranzen angegeben werden.

- Der Druckanstieg bei feinblasigen Belüftungen (Verstopfungsgarantie).

Während einer bestimmten Zeit (z.B. 2 Jahre) darf der Druckanstieg bei max. Luftmenge einen bestimmten Wert (z.B. 30 mbar) nicht überschreiten.

Bestimmte Betriebsbedingungen müssen hiezu definiert werden, z.B. Spülung der Belüfter mit max. Luftmenge 2 x pro Woche während 30 Min, keine Luftunterbrüche länger als 4 Stunden, einwandfreie Luftfiltration etc.

Bei Nichterfüllung der Garantie ist die Lieferfirma zur kostenlosen Reinigung der Belüfter zu verpflichten. Die gereinigten Belüfter unterliegen erneut einer vollen Garantiezeit.

- Massnahmen bei Nichterfüllung der Garantie werden nur ausnahmsweise in die Garantiebestimmungen aufgenommen.

Bei Nichterfüllung der Garantie sind Verbesserungen an der Belüftung vorzunehmen. Die Kosten dieser Verbesserungen sowie allfällige Kosten weiterer Sauerstoffzufuhrversuche gehen zu Lasten der Lieferfirma.

Die erforderliche maximale Sauerstoffzufuhr muss immer erreicht werden. Für den Fall, dass der Sauerstoffertrag nicht erreicht wird, kann eine Entschädigung etwa in der Höhe der Mehrstromkosten während der Lebensdauer der Kläranlage festgelegt werden.

##### 5. FEINBLASIGE BELUEFTUNGEN

Aus feinblasigen Belüftern strömt Luft durch kleine Oeffnungen ins Wasser.

Formen und Materialien der meist bekannten feinblasigen Belüfter:

- Dome, Teller bzw. Rohre aus porösem keramischen Material (gesintert bzw. geklebt).
- Teller bzw. Rohre aus porösem Kunststoff
- Folien mit Miniöffnungen
- Rohre aus geschlitztem Gummi

### 5.1 Theorie des Lufteintrags und des Verstopfungsvorgangs

Auf der Oberfläche einer Flüssigkeit wirkt die Oberflächenspannung. Diese wird als eine Kraft definiert, die zur Dehnung der Oberfläche erforderlich ist und beträgt bei Reinwasser 73 dyn/cm ( $1 \text{ dyn} = \text{N} \cdot 10^{-5} \approx 1 \text{ mg}$ ).

Beim Lufteintritt aus kleinen Oeffnungen der feinblasigen Belüftung ins Wasser muss die Oberflächenspannung überwunden werden. Die erforderliche Druckdifferenz ( $\Delta p_{\text{an}}$ ) bei der sich die Blasen zu bilden beginnen ist indirekt proportional dem Durchmesser (D) der Oeffnungen und beträgt im Reinwasser etwa:

D	$\mu\text{m}$	50	100	200	300	500
$\Delta p_{\text{an}}$	mm WS	600	300	150	100	60

Bei Belüftern aus porösem keramischen Material beträgt die Fläche der Oeffnungen etwa 40% der Oberfläche, wovon nur ein kleiner Teil ( $\approx 10\%$  der Oeffnungen) bläst. Der Durchmesser der Oeffnungen beträgt etwa 100 bis 300  $\mu\text{m}$ . Bei min. Luftmenge blasen zuerst die grössten Oeffnungen. Steigt die Luftmenge und dadurch auch der Differenzdruck, beginnen weitere und zwar die nächstgrössten Oeffnungen zu blasen.

Bei keramischen Domen und Tellern wird die Luftzufuhr zu diesen meist gedrosselt. Durch den Druckverlust in der Drosselung wird eine bessere Luftverteilung erreicht. (vgl. Bild 1).

In den folgenden Punkten werden Faktoren, die zur Verstopfung von feinblasigen Belüftern führen können sowie mögliche Gegenmassnahmen diskutiert (vgl. Bild 2):

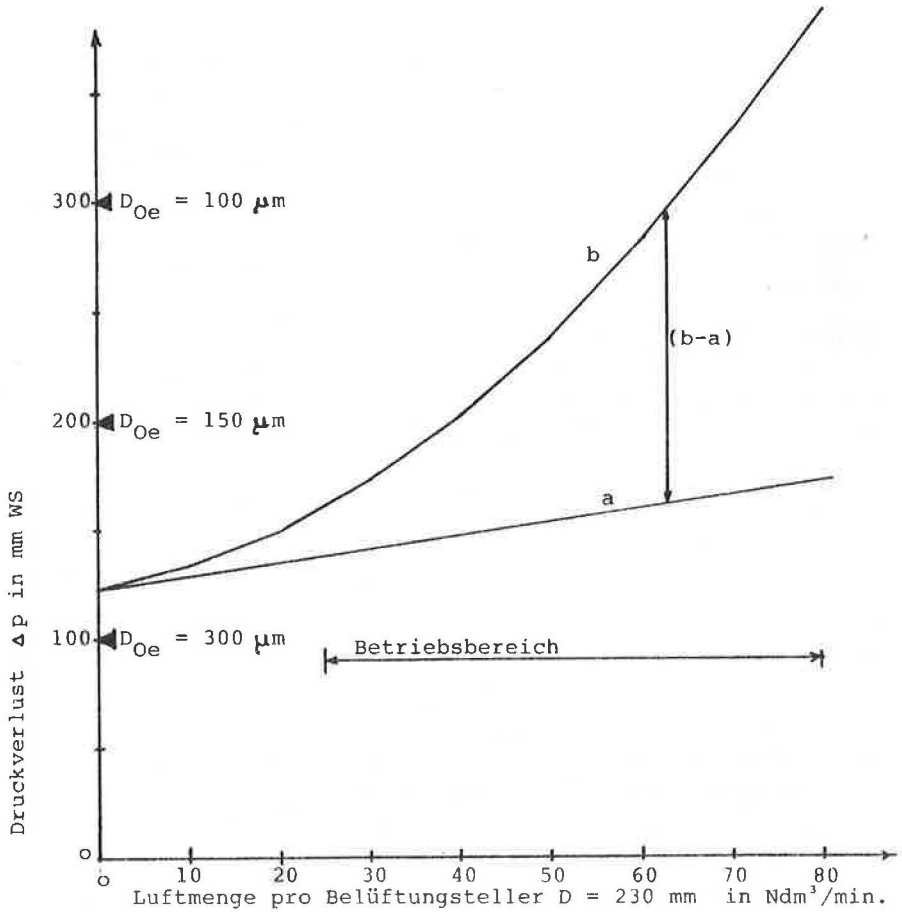


Bild 1 Druckverluste in feinblasigen Belüftungstellern

Legende

- a Kurve der Druckverluste im neuen keramischen Teller  $D = 230 \text{ mm}$
- b Kurve der Druckverluste im neuen keramischen Teller  $D = 230 \text{ mm}$  und in einer Drosselöffnung ( $30 \text{ mm}^2$ )
- $(b-a)$  Druckverlust in der Drosselöffnung ( $30 \text{ mm}^2$ )
- $D_{Oe}$  theoretischer Durchmesser einer Oeffnung in  $\mu\text{m}$ , die bei Druckverlust (Differenzdruck)  $\Delta p$  zu blasen beginnt.

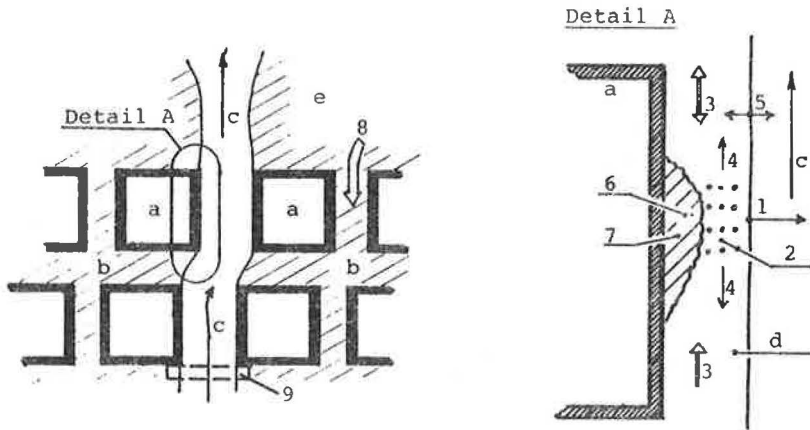


Bild 2 Schematische Darstellung der vermutlichen physikalischen, chemischen und biologischen Vorgänge in einem porösen keramischen Belüfter

Legende:

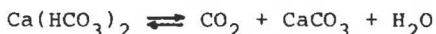
- a feste Teilchen des Belüfters
  - b vermaschte Zwischenräume (Kanäle) mit Wasser oder Luft gefüllt
  - c Luftstrom (Weg des geringsten Widerstandes)
  - d dünne Membrane (Wasser bzw. Belebtschlamm)
  - e Belebtschlamm im Belüftungsbecken
- 
- 1 Verdunsten von Wasser
  - 2 Aufkonzentrierung der gelösten und ungelösten Stoffe
  - 3 Bewegung in der Membrane verursacht durch:
    - Verdunstung (Ersetzen des verdunsteten Wassers)
    - den Luftstrom (Reibung auf der Grenzfläche)
  - 4 Konzentrationsausgleich durch Diffusion
  - 5 Gasaustausch zwischen Luft und Wasser bei unterschiedlichen Partialdrücken ( $\text{CO}_2$ , Säuren)
  - 6 Kristallbildung beim Erreichen einer kritischen Konzentration (Masse aus Kristallen, organischen Stoffen, Bakterien etc.)
  - 7 allfälliges Auflösen von Kristallen durch aerobe bzw. anaerobe bakterielle Tätigkeit
  - 8 Ansiedeln von Kleinlebewesen in den Belüftern
  - 9 Verstopfungen durch Luftverschmutzung

- Das Austrocknen der dünnen Wassermembrane ist von der Luftgeschwindigkeit, der Temperatur der Luft und des Wassers, vor allem jedoch von der relativen Feuchtigkeit der Luft abhängig. Diese kann durch Abkühlen und Befeuchten erhöht werden .  
Aus diesem Gesichtspunkt sind Luftleitungen aus Stahl (besserer Temperatenausgleich) gegenüber Kunststoffleitungen von Vorteil.

- Eine Wasserbewegung in der Membrane wird einerseits durch das Verdunsten (Ersetzen des verdunsteten Wassers) andererseits vermutlich durch die Reibung der strömenden Luft verursacht. Die durch die Luftreibung verursachte Wasserbewegung ist nicht nur von der Luftgeschwindigkeit, sondern vermutlich auch von der Art des Belüfters (Folie, poröser Körper, etc.) abhängig. Wahrscheinlich ist die Wasserbewegung in porösen Belüftungskörpern mit vielen mit Wasser gefüllten Zwischenräumen grösser als in gelochten Folien. Ein schneller Wasseraustausch in der Membrane wirkt gegen eine allfällige Kristallbildung.

- Gasaustausch Luft - Wasser

Die Kristallbildung wird durch das Entweichen des  $\text{CO}_2$  aus dem Wasser in die Luft begünstigt (KELLER, 1982).



Säuren können aus der Luft, die z.B. mit Ameisensäure künstlich gesättigt wird (vgl. Abs. 5.3) in die Wassermembrane übergehen und Kristalle auflösen.

- Beschaffenheit des Belebtschlammes im Belüftungsbecken. Höherer Salzgehalt begünstigt vermutlich die Kristallbildung; dagegen scheinen organische Stoffe keinen oder einen negativen Einfluss auf die Kristallbildung zu haben.

In einigen längst durchflossenen Belüftungsbecken scheinen feinblasige Belüfter schneller beim Auslauf (höhere Salzkonzentration) als beim Zulauf zu verstopfen.



In einer zweistufigen biologischen Kläranlage ohne Vorklärung mit einer hohen organischen Belastung (angeschlossener Schlachthof) konnte nach dreijährigem Betrieb kein Druckanstieg in den keramischen Domen festgestellt werden. Die Belüfter werden regelmässig mit max. Luftmenge gespült.

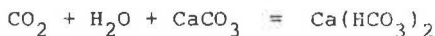
- Kristallbildung in der Membrane

Die durch das Austrocknen verursachte Aufkonzentrierung wird fortlaufend durch Diffusion sowie Wasserbewegung vermindert. Es ist anzunehmen, dass sich ein Gleichgewichtszustand einstellt. Kristallbildung in der Membrane beginnt erst dann, wenn eine kritische Konzentration erreicht wird. Es bildet sich dann vermutlich eine Masse aus Kristallen (überwiegend  $\text{CaCO}_3$ ), organischen sowie anorganischen Stoffen des Belebtschlammes sowie aus Bakterien.

- Auflösung der Kristalle

Bei verschiedenen Versuchen mit feinblasigen Belüftern (KELLER, 1982) wurde beobachtet, dass der Druckverlust in neuen Belüftern nach deren Inbetriebnahme zuerst steigt und nach einer bestimmten Zeit (einige Monate) plötzlich fällt. Der Grund für diese plötzliche Verminderung des Druckverlustes (Entstopfung) liegt vermutlich in einer selbständigen Auflösung der Kristalle, die durch folgende Vorgänge verursacht werden kann.

- Aerobe bakterielle Tätigkeit in der organischen Masse zwischen den Kristallen mit Bildung von  $\text{CO}_2$ .



- anaerobe bakterielle Tätigkeit (saure Gärung) in den mit Belebtschlamm gefüllten Zwischenräumen eines porösen Belüfters. Die dabei entstandenen organischen Säuren können durch Diffusion bis in die Membrane gelangen.
- Biologisches Verwachsen der Belüfter  
Bei Belüftern, die eine längere Zeit abgestellt werden oder die eine längere Zeit nur mit geringen Luftmengen gefahren werden, können sich in den mit Wasser gefüllten Zwischenräumen Bakterien ansiedeln, wodurch diese verstopfen. Eine Spülung von feinblasigen Belüftern mit maximaler Luftmenge mindestens 2 x pro Woche ist darum erforderlich.
- Die Luftverunreinigung führt nur selten zu Verstopfungen, da die Luftfiltration in der Regel zuverlässig funktioniert.

#### 5.2 Betriebserfahrungen, Versuche der Verstopfungsanfälligkeit von Belüftern, Reinigungsmöglichkeiten

Verstopfungsanfälligkeit von feinblasigen Belüftungen ist von vielen Faktoren abhängig. Dieselbe Belüftung kann in bestimmten Kläranlagen einwandfrei funktionieren, in anderen dagegen verstopfen. In verschiedenen Kläranlagen werden darum Versuche der Verstopfungsanfälligkeit vorgängig der Wahl des Belüftungssystems durchgeführt.

Dome aus porösem keramischem Material haben sich allgemein gut bewährt. Bei einigen Kläranlagen sind diese über 10 Jahre ohne Reinigung im Einsatz. Für die Belüftungsbecken der Kläranlage Zürich Werdhölzli wurde nach eingehenden Prüfungen feinblasige Flächenbelüftung mit keramischen Domen ( $D = 180 \text{ mm}$ ) gewählt. Belüfter (Rohre, Teller) aus porösen Kunststoffkörpern sind in der Regel verstopfungsanfälliger als keramische Belüfter und müssen öfters gereinigt werden.

Im Kanton Zürich ist eine feinblasige Plattenbelüftung mit elastischen Folien in einer Kläranlage installiert (Inbetriebnahme März 1985). Die Belüftung wird überwiegend mit der minimalen Luftmenge gefahren und 1 x pro Woche zweimal hintereinander kurzfristig abgestellt und entlüftet, anschliessend dann mit voller Luftmenge durchgeblasen. Dabei werden vermutlich allfällige Verkrustungen, die in und auf den Oeffnungen entstehen abgebrochen und ausgeblasen. Im ersten Halbjahr stieg der Druckverlust von mittl.  $\Delta p = 0,56$  m auf  $\Delta p = 0,68$  m, d.h. um 0,12 m. Der Druckverlust ist zur Zeit stabil. Die Luftverteilung ist im Belüftungsbecken unregelmässig; es kommt massgebend mehr Luft beim Einlauf als beim Auslauf.

### 5.3 Reinigung feinblasiger Belüfter durch Zugabe von Säuren in die Druckluft

Durch Zugabe von Ameisensäure in die Druckluft können Verstopfungen in den Belüftern aufgelöst werden.

Prinzip: Bei laufender Belüftung wird Ameisensäure mit einer Dosierpumpe (4 - 6 l/h) in die Druckleitung zugegeben.

Bei säurebeständigen Rohrleitungen aus Kunststoff oder Chromnickelstahl kann 80 % technische Ameisensäure benützt werden. Bei Rohrleitungen aus verzinktem Blech wird 98 - 99 % Ameisensäure angewendet. Die Rohrleitungen müssen vorgängig gut entwässert werden.

Die Dosiermengen umgerechnet auf 100 % Ameisensäure betragen etwa:

- |  |   |
|--|---|
| - bei verstopften Belüftern (einmalig)                             | 10 g/Belüfter D=180mm<br>400 g/m <sup>2</sup> Belüfterfläche      |
| - zur Verhinderung von Verstopfungen regelmässig ca. 1 x pro Woche | 0,5-1,5g/Belüfter D=180mm<br>20-60g/m <sup>2</sup> Belüfterfläche |

Dieses Verfahren wird in weit über 100 Kläranlagen mit Erfolg angewendet und ist fast in allen Ländern der Welt patentiert.

## 6. OBERFLAECHEBELUEFTER

Die meisten in den schweizer Kläranlagen installierten Oberflächenbelüfter sind zentralsymmetrisch.

Beim Bau von neuen bzw. bei Erneuerungen von Kläranlagen ist ein Trend von Oberflächenbelüftern zur feinblasigen Belüftung unverkennbar. Es werden die oft vorkommenden Nachteile der Oberflächenbelüfter wie

- Aerosolbildung (Glatteis)
  - Lärmbelästigung
  - Abkühlung des Belebtschlammes
- höher bewertet als die Vorteile
- geringere Baukosten
  - Wartungsfreundlichkeit

Es muss hier betont werden, dass die erwähnten Nachteile der Oberflächenbelüfter durch geeignete Massnahmen (TOFAUTE, 1983) behoben oder gedämpft werden können.

## 7. HINWEISE ZUR PROJEKTIERUNG VON DRUCKLUFTAGGREGATEN

In diesem Abschnitt werden zwei Themen behandelt, die weniger bekannt sind und bei denen es leicht zu Fehlentscheidungen kommen kann.

### Frequenzumformer

In den Frequenzumformern wird Wechselstrom in Gleichstrom und dieser dann wieder in Wechselstrom mit einer anderen Frequenz umgewandelt.

Durch Frequenzumformer können Umdrehungen von Drehstrom-Motoren und damit auch Umdrehungen von Gebläsen stufenlos gesteuert werden.

Elektromotoren mit Frequenzumformer brauchen bei der Nennleistung (max. Leistung) etwa 5,0 % mehr Strom als Elektromotoren ohne Frequenzumwandler. Der Mehrstromverbrauch bleibt

bleibt über dem ganzen Steuerbereich konstant.

Bei einem Steuerbereich z.B. 100% - 25% kann der Stromverbrauch bei minimaler Leistung massgebend höher liegen als bei einem nicht gesteuerten, kleineren Gebläse.

Frequenzumformer können vor allem zweckmässig bei grösseren Gebläsestationen, bei denen nur ein Gebläse frequenzgesteuert wird und bei kleineren Oberflächenbelüftern angewendet werden.

#### Turboverdichter

Turboverdichter (Radialverdichter) können für Förderströme von 1500 - 100'000 Nm<sup>3</sup>/h und eine max. Druckdifferenz von 12 m WS (einstufig) geliefert werden.

Der Förderstrom kann stufenlos durch den Verstelldiffusor zwischen 45 - 100% geregelt werden. Der Wirkungsgrad bleibt dabei über dem gesamten Regelbereich annähernd konstant. Bei mindestens zwei Aggregaten kann eine stufenlose Regelung 22,5 - 100% erreicht werden.

Die Druckdifferenz kann dagegen nicht geändert werden. Die Turboverdichter müssen darum auf die maximale Druckdifferenz ausgelegt werden. Bei kleineren Druckdifferenzen während des Betriebs muss der überschüssige Druck in Drosselschiebern reduziert werden.

Die Umfangsgeschwindigkeit des Rotors bzw. die Luftgeschwindigkeit im Verstelldiffusor ist sehr hoch und beträgt beispielsweise bei einem Differenzdruck von 5,7 m WS etwa 300 m/s.

Die Kugellager der kleineren Aggregate (bis etwa 5000 Nm<sup>3</sup>/h) müssen nach etwa 20'000 Betriebsstunden und die Gleitlager der grösseren Aggregate nach etwa 50'000 Betriebsstunden

revidiert werden.

Der Wirkungsgrad der Turboverdichter im Betrieb beträgt etwa:

Turboverdichter (adiabatisch)	80 %
Getriebe	95 - 97 %
Elektromotor	95 %

Die Turboverdichter sind bei Luftmengen bis zu etwa 50'000 Nm<sup>3</sup>/h teurer als Gebläse, haben jedoch einen etwas besseren Wirkungsgrad. Bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit ist zu berücksichtigen, wie vorher erwähnt, dass die Turboverdichter immer mit der max. Druckdifferenz arbeiten müssen.

#### LITERATURVERZEICHNIS

- AGW :Garantiebestimmungen von Belüftungseinrichtungen, Amt für Gewässerschutz und Wasserbau des Kantons Zürich, CH 8090 Zürich, 1980.
- ATV :Arbeitsanleitung für die Bestimmung der Sauerstoffzufuhr von Belüftungssystemen in Reinwasser; Korrespondenz Abwasser, 8/1979
- HV-TURBO :Turbo-Verdichter  
HV-Turbo A/S, Allegade 2,  
DK 3000 Helsingør, Dänemark, 1982
- KAYSER R. :Ermittlung der Sauerstoffzufuhr von Abwasserbelüftern unter Betriebsbedingungen, Veröffentlichungen TH Braunschweig, 1967
- KAYSER R. :Wirtschaftlichkeit verschiedener Belüftungssysteme unter Betriebsbedingungen, Wiener Mitteilungen, Band 47, 1982

- KELLER U. :Langzeitversuche mit verschiedenen Druck-  
belüftern und mit Luftmengenregulierung  
in der Belebtschlammanlage der ARA  
Altenrhein. Verband Schweizerischer Ab-  
wasserfachleute, Bericht Nr. 216, 1982
- KORAL J. :Berechnung des Sauerstoffeintrags in  
Belebungsanlagen, Gas-Wasser-Abwasser,  
1980
- ÖNORM :Sauerstoffzufuhr-Leistung von Belüftungs-  
einrichtungen, ÖNORM M 5888, 1979
- STENSTROM, M. :Oxygentransferparameter  
BROWN L.C. estimation (Programm für TI-59). Journal  
of the Env. Div. ASCE (April 1981)
- TOFAUTE K. :Ist der Einsatz von zentralsymmetrischen  
Oberflächenbelüftern noch vertretbar?  
Korrespondenz Abwasser, 9/83
- VERORDNUNG :Verordnung über Abwassereinleitungen  
des schweizerischen Bundesrates, 1975

KORAL JAN, Dipl.-Ing.  
Amt für Gewässerschutz und Wasserbau  
des Kantons Zürich  
CH 8090 Zürich

## ERGEBNISSE VON SAUERSTOFFZUFUHRVERSUCHEN IN ALTHENRHEIN (SCHWEIZ)

H. Burkhalter

### 1. PROBLEMSTELLUNG

Hohe Betriebskosten für die Sauerstoffzufuhr veranlassten den Abwasserverband Altenrhein, Entscheidungsgrundlagen für den Ersatz des Belüftungssystems zu erarbeiten.

In einem Langzeitversuch werden bei verschiedenen Druckluft-Belüftungssystemen die Eintragsleistung und die Störanfälligkeit geprüft. Der Ertrag konnte nicht bestimmt werden, weil der Energieaufwand für die Druckluftherzeugung nicht einzeln gemessen werden kann.

Die ersten Eintragsversuche fanden im Februar 1981 statt. In den bisher 10 Messkampagnen haben wir 16 verschiedene Systeme getestet. Die Versuche sind noch nicht abgeschlossen.

### 2. VERSUCHSANLAGE

Die 6 Doppel - Belüftungsbecken mit je  $2 \times 750 \text{ m}^3$  Inhalt ermöglichen die gleichzeitige Prüfung von 6 bis 8 Belüfertypen. Mit einer mobilen Tauchwand kann das letzte Drittel eines Beckens (ca.  $220 \text{ m}^3$ ) mit den installierten Testbelüftern für die Eintragsversuche abgetrennt werden. Die Luftmenge und der Druck werden in der Zuleitung zum Versuchsbecken gemessen.

Für die Vergleichsmessungen war ein einheitlicher Luftdurchsatz von  $230 \text{ Nm}^3/\text{h}$  Basis der Eintragsversuche. Ueber die weiteren Versuche mit anderen Luftmengen wird hier nicht berichtet.



Bei der Sauerstoffbestimmung im Abwasser gelangten 3 Züllig - Sonden mit Registrierung und 2 WTW-, Philips- oder Yellow - Spring - Sonden zum Einsatz.

Die Atmung des Schlammes haben wir mit 3 verschiedenen Methoden bestimmt.

1. 80 - Liter - Fass im Belüftungbecken aufgehängt, gerührt, mit eingehängter Sonde. ( 2 Messungen pro Versuch)
2. Mantelrohr um eine installierte Stabsonde, mit Bodenklappe. (3 bis 4 Messungen von max. 12 Minuten Dauer pro Versuch)
3. Geschlossener Zylinder mit Rührwerk und Sonde ausserhalb des Beckens. (2 Messungen pro Versuch)

Die erste und insbesondere die zweite Methode haben den Vorteil der raschen Bestimmung der Atmung unter Betriebsbedingungen, da die Messung im Becken erfolgt.

Weitere Details der Anlage und der Installationen sind aus der Arbeit von KELLER, 1982 ersichtlich.

### 3. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND AUSWERTUNG

Der Abwasserzulauf und der Schlammrücklauf zum Belüftungsbecken werden abgestellt und die Tauchwand abgesenkt. Für die Sauerstoffzehrung wird die Luftzufuhr so weit wie möglich reduziert. Sie darf nicht abgestellt werden, da sonst Wasser in die Belüfter eindringen kann. Dadurch wird beim Beginn des Versuches die Eintragsleistung beeinträchtigt.

Wenn die notwendige Sauerstoffreduktion von 2 bis 3 mg O<sub>2</sub>/l erreicht ist, kann der Eintragsversuch gestartet werden. Er wird bis zur stationären Konzentration c\* geführt. Der zeitliche Verlauf der Sauerstoffkonzentration c(t) wird aufgezeichnet.

Während des Eintragsversuches wird laufend die Atmung OV des Belebtschlammes gemessen.

Die Auswertung erfolgt nach der halblogarithmischen Methode (KAYSER, 1967 ; ATV, 1979 ; HANEL, 1982). Durch Variation der Konzentration  $c^*$  wird der Korrelationskoeffizient der Ausgleichsgeraden

$$k_T t = \ln ( c^* - c(t) )$$

optimiert.

Aus dem Wert der Belüfterkonstanten  $k_T$  und der Atmung OV ergibt sich die Eintragsleistung  $OC_T$  des Belüfters unter Betriebsbedingungen. Er wird nicht auf Standardbedingungen umgerechnet.

Die für die Lösungsdynamik massgebende Sättigung  $c'_s$  beträgt

$$\begin{aligned} c'_s &= c^* + OV/k_T \\ OC_T &= c'_s \cdot k_T \end{aligned}$$

#### 4. ERGEBNISSE

In den folgenden Tabellen sind die Betriebsbedingungen, die Druckwerte und die Eintragsleistungen von 10 der untersuchten Belüftungssysteme für den Vergleichs - Luftdurchsatz von  $230 \text{ Nm}^3/\text{h}$  zusammengestellt. Der angegebene Wert eines Versuchstages ist der Mittelwert von zwei Eintragsversuchen im gleichen Becken.

Belüftungssystem 1

Luftmenge  $230 \text{ Nm}^3/\text{h} \hat{=} 1.05 \text{ Nm}^3/\text{m}_{\text{BB}}^3 \cdot \text{h}$

Keramik Dom A

$\hat{=} 62.84 \text{ Nm}^3/\text{m}_0^2 \cdot \text{h}$

Alu - Oxyd, feinblasig

144 Stück  $3.66 \text{ m}_0^2$

Beckenvolumen  $219 \text{ m}_{\text{BB}}^3$

Einblastiefe  $3.61 \text{ m}_T$

Messreihe	Datum	Versuchsbedingungen				Druck in Zu- Leitg.  cm WS	Eintragsleistung		Bemerkungen
		Wasser- temp.  °C	Luft- druck  mbar	Oberfl. spanng.  $10^{-3} \text{ N/m}$	TS - Gehalt  $\text{kg}/\text{m}_{\text{BB}}^3$		Eintrag  $\frac{\text{g O}_2}{\text{m}_{\text{BB}}^3 \cdot \text{h}}$	Ausnützg.  $\frac{\text{g O}_2}{\text{Nm}_L^2 \cdot \text{m}_T}$	
2A	4. 8.81	19.0	983	62	1.44	394	37.44	9.88	
2B	6. 8.81	19.4	968	65	1.56	393	37.06	9.78	
3	1.12.81	8.4	968	66.3	1.45	385	35.10	9.26	
4	22. 3.82	11.0	977	68.2		390	33.56	8.86	
5	7. 9.82	18.0	974	70.9	2.5	395	41.73	11.01	
6	22. 3.83	13.0	967	63.9	2.11	395	36.86	9.72	
7	16.11.83	14.8	966	66.2	2.20	390	33.67	8.88	
8	21. 8.84	18.0	976	64.7	2.29	402	38.53	10.16	
9	13.12.84	14.5	973	64.5	2.57	400	42.29	11.15	
10	21. 6.85	17.6	969	65.0	2.62	395	40.11	10.58	
					Mittel $\sigma \pm$	393.9 4.6	37.64 3.07	9.93	$\alpha = 0.66$
4	25. 3.82	10.0	1013	73.5	Reinw.	390	57.37	15.13	

Belüftungssystem 2

Luftmenge  $230 \text{ Nm}^3/\text{h} \hat{=} 1.05 \text{ Nm}^3/\text{m}_{\text{BB}}^3 \cdot \text{h}$

Keramik - Dom B

$\hat{=} 90.55 \text{ Nm}^3/\text{m}_0^2 \cdot \text{h}$

Alu - Oxyd, feinblasig

100 Stück  $2.54 \text{ m}_0^2$

Beckenvolumen  $218 \text{ m}_{\text{BB}}^3$

Einblastiefe  $3.60 \text{ m}_{\text{T}}$

Messreihe	Datum	Versuchsbedingungen				Druck in Zu- Leitg.  cm WS	Eintragsleistung		Bemerkungen
		Wasser- temp.  °C	Luft- druck  mbar	Oberfl. spanng.  $10^3 \text{ N/m}$	TS - Gehalt  $\text{kg}/\text{m}_{\text{BB}}^3$		Eintrag  $\frac{\text{g O}_2}{\text{m}_{\text{BB}}^3 \text{ h}}$	Ausnützg.  $\frac{\text{g O}_2}{\text{Nm}_{\text{L}}^3 \cdot \text{m}_{\text{T}}}$	
2	5. 8.81	18.9	977	66	1.41	401	33.92	8.93	
3	1.12.81	9.8	972	65.7	1.72	405	42.39	11.17	
4	23. 3.82	11.8	980	67.5		405	31.10	8.19	
5	6. 9.82	18.6	970	67.1	2.16	404	44.38	11.69	
6	23. 3.83	12.3	965	63.3	2.33	400	35.09	9.24	
7	16.11.83	15.0	966	64.8	2.16	402	34.64	9.12	
8	22. 8.84	18.6	972	66.3	2.44	385	37.34	9.83	
					Mittel	405.0	37.30	9.82	$\alpha = 0.61$
					$\sigma_{\pm}$	14.8	4.52		
4	25. 3.82	10.0	1013	73.5	Reinw.	406	61.64	16.23	

Belüftungssystem 3

Luftmenge  $230 \text{ Nm}^3/\text{h} \hat{=} 1.05 \text{ Nm}^3/\text{m}_{\text{BB}}^3 \cdot \text{h}$

Keramik - Teller

$\hat{=} 57.60 \text{ Nm}^3/\text{m}_0^2 \cdot \text{h}$

Corund, feinblasig

96 Stück  $3.99 \text{ m}_0^2$

Beckenvolumen  $213 \text{ m}_{\text{BB}}^3$

Einblastiefe  $3.69 \text{ m}_{\text{T}}$

Messreihe	Datum	Versuchsbedingungen				Druck in Zu- Leitg.  cm WS	Eintragsleistung		Bemerkungen
		Wasser- temp.  °C	Luft- druck  mbar	Oberfl. spanng.  $10^3 \text{ N/m}$	TS - Gehalt  $\text{kg}/\text{m}_{\text{BB}}^3$		Eintrag  $\frac{\text{g O}_2}{\text{m}_{\text{BB}}^3 \text{ h}}$	Ausnützg.  $\frac{\text{g O}_2}{\text{Nm}_{\text{L}}^3 \cdot \text{m}_{\text{T}}}$	
1	24. 2.81	12.0	972	56	2.22	425	37.78	9.48	Wasserqualität ?
2	5. 8.81	19.1	974	65	1.70	384	34.82	8.74	
3	2.12.81	11.7	979	65.4	2.20	420	49.09	12.32	
4	22. 3.82	10.4	977	67.5		398	32.85	8.24	
5	8. 9.82	18.8	976	68.7	4.09	391	39.91	10.02	
6	21. 3.83	12.2	970	63.3	2.37	403	39.71	9.96	
7	7.11.83	15.5	976	65.4	2.87	410	27.12	6.81	
					Mittel $\sigma_{\pm}$	404.4 13.8	37.33 6.85	9.37	$\alpha = 0.65$
4	24. 3.82	10.0	1013	73.5	Reinw.	390	57.35	14.39	

Belüftungssystem 4

Luftmenge  $230 \text{ Nm}^3/\text{h} \hat{=} 1.05 \text{ Nm}^3/\text{m}_{\text{BB}}^3 \cdot \text{h}$

Teller - Belüfter

$\hat{=} 113.3 \text{ Nm}^3/\text{m}_0^2 \cdot \text{h}$

gesintertes PE, feinblasig

80 Stück  $2.03 \text{ m}_0^2$

Beckenvolumen  $224 \text{ m}_{\text{BB}}^3$  Einblastiefe  $3.65 \text{ m}_{\text{T}}$

Messreihe	Datum	Versuchsbedingungen				Druck in Zu- Leitg. cm WS	Eintragsleistung		Bemerkungen
		Wasser- temp. °C	Luft- druck mbar	Oberfl. spanng. $10^3 \text{ N/m}$	TS - Gehalt $\text{kg}/\text{m}_{\text{BB}}^3$		Eintrag $\frac{\text{g O}_2}{\text{m}_{\text{BB}}^3 \cdot \text{h}}$	Ausnützg. $\frac{\text{g O}_2}{\text{Nm}_{\text{T}}^3 \cdot \text{m}_{\text{T}}}$	
1	24. 2.81	11.4	972	57	2.00	440	35.28	9.42	Wasserqualität ?
3	3.12.81	12.4	982	66.2		370	31.93	8.52	
4	23. 3.82	11.4	980	67.6		415	30.06	8.03	
5	8. 9.82	18.6	977	71.7	2.53	390	34.57	9.22	
6	21. 3.83	12.0	971	64.4	1.95	403	32.88	8.77	
7	7.11.83	15.5	976	64.5	2.32	390	24.80	6.61	
					Mittel $\sigma \pm$	401.3 22.1	31.59 3.81	8.42	

Belüftungssystem 5

Luftmenge  $230 \text{ Nm}^3/\text{h} \hat{=} 1.05 \text{ Nm}^3/\text{m}_{\text{BB}}^3 \cdot \text{h}$

Keramik - Dom C

$\hat{=} 90.55 \text{ Nm}^3/\text{m}_0^2 \cdot \text{h}$

Alu - Oxyd - Korund, feinblasig

100 Stück  $2.54 \text{ m}_0^2$

Beckenvolumen  $219 \text{ m}_{\text{BB}}^3$  Einblastiefe  $3.60 \text{ m}_{\text{T}}$

Messreihe	Datum	Versuchsbedingungen				Druck in Zu-Leitg. cm WS	Eintragsleistung		Bemerkungen
		Wasser-temp. °C	Luft-druck mbar	Oberfl.-spanng. $10^{-3} \text{ N/m}$	TS - Gehalt $\text{kg}/\text{m}_{\text{BB}}^3$		Eintrag	Ausnützg.	
							$\frac{\text{g O}_2}{\text{m}_{\text{BB}}^3 \cdot \text{h}}$	$\frac{\text{g O}_2}{\text{Nm}_{\text{T}}^3 \cdot \text{m}_{\text{T}}}$	
6	24. 3.83	13.0	955	63.9	2.17	380	45.33	11.99	
7	10.11.83	16.0	978	66.8	2.10	390	52.00	13.75	
8	23. 8.84	19.6	966	65.2	2.29	385	37.72	9.98	
9	11.12.84	13.5	985	64.5	2.55	400	39.73	10.51	
10	24. 6.84	16.2	972	68.5	2.50	385	36.80	9.73	
					Mittel G:	388.0 6.8	42.32 6.35	11.19	

Belüftungssystem 6

Luftmenge  $230 \text{ Nm}^3/\text{h} \hat{=} 1.05 \text{ Nm}^3/\text{m}_{\text{BB}}^3 \cdot \text{h}$

Teller - Belüfter

$\hat{=} 55.29 \text{ Nm}^3/\text{m}_0^2 \cdot \text{h}$

Kustharzgebundener Quarz

42 Stück  $4.16 \text{ m}_0^2$

Beckenvolumen  $224 \text{ m}_{\text{BB}}^3$  Einblastiefe  $3.65 \text{ m}_{\text{T}}$

Messreihe	Datum	Versuchsbedingungen				Druck in Zu- Leitg.  cm WS	Eintragsleistung		Bemerkungen
		Wasser- temp.  °C	Luft- druck  mbar	Oberfl. spanng.  $10^{-3} \text{ N/m}$	TS - Gehalt  $\text{kg}/\text{m}_{\text{BB}}^3$		Eintrag	Ausnützg.	
							$\frac{\text{g O}_2}{\text{m}_{\text{BB}}^3 \cdot \text{h}}$	$\frac{\text{g O}_2}{\text{Nm}_{\text{T}}^3 \cdot \text{m}_{\text{T}}}$	
6	23. 3.83	12.3	968	59.8	3.38	408	26.38	7.04	
7	8.11.83	16.0	977	65.8	2.06	370	30.95	8.26	
8	20. 8.84	17.4	977	70.3	1.98	398	42.01	11.21	
9	13.12.84	14.5	973	64.3	2.40	385	42.09	11.23	
10	19. 6.85	17.6	966	64.5	2.90	380	37.13	9.90	
					Mittel G:	388.2 13.4	35.71 6.93	9.52	



Belüftungssystem 7

Luftmenge 230 Nm<sup>3</sup>/h  $\hat{=}$  1.05 Nm<sup>3</sup>/m<sub>BB</sub><sup>3</sup>.h

Kerzen - Belüfter

$\hat{=}$  10.95 Nm<sup>3</sup>/m'.h

Kunststoff

42 Stück 21 m'

Beckenvolumen 224 m<sub>BB</sub><sup>3</sup> Einblastiefe 3.60 m<sub>T</sub>

Messreihe	Datum	Versuchsbedingungen				Druck in Zu- Leitg.  cm WS	Eintragsleistung		Bemerkungen
		Wasser- temp.  °C	Luft- druck  mbar	Oberfl. spanng.  10 <sup>3</sup> N/m	TS - Gehalt  kg/m <sub>BB</sub> <sup>3</sup>		Eintrag  $\frac{g O_2}{m_{BB}^3 h}$	Ausnützg.  $\frac{g O_2}{Nm_T^3 \cdot m_T}$	
1	27. 2.81	12.5	973	48	2.34	372	27.37	7.40	
2	6. 8.81	19.2	973	66	1.79	377	23.50	6.36	
3	30.11.81	10.6	955	67.0	1.44	380	29.61	8.02	
5	7. 9.82	17.4	973	67.6	3.40	385	34.17	9.24	
					Mittel G <sub>t</sub>	378.5 4.7	28.66 4.46	7.75	

Belüftungssystem 8

Luftmenge 230 Nm<sup>3</sup>/h  $\hat{=}$  1.05 Nm<sup>3</sup>/m<sub>BB</sub><sup>3</sup>.h

Kerzen - Belüfter

$\hat{=}$  9.07 Nm<sup>3</sup>/m'.h

Stahlrohr mit Gummimantel

59 Stück 25.35 m'

Beckenvolumen 224 m<sub>BB</sub><sup>3</sup> Einblastiefe 3.60 m<sub>T</sub>

Messreihe	Datum	Versuchsbedingungen				Druck in Zu- Leitg. cm WS	Eintragsleistung		Bemerkungen
		Wasser- temp. °C	Luft- druck mbar	Oberfl. spanng. 10 <sup>3</sup> N/m	TS - Gehalt kg/m <sub>BB</sub> <sup>3</sup>		Eintrag $\frac{g O_2}{m_{BB}^3 h}$	Ausnützg. $\frac{g O_2}{Nm_{T.}^3 \cdot m_T}$	
1	26. 2.81	12.6	976	58	2.30	405	24.89	6.73	
2	6. 8.81	19.0	972	65	1.79	408	18.65	5.04	
3	30.11.81	10.6	965	67.1	1.44	412	22.00	5.95	
					Mittel ±	408.3 2.9	21.85 3.12	5.91	

Belüftungssystem 9

Stahlrohr mit Schaumgummimantel

32 Stück  $1.53 \text{ m}_0^2$

Luftmenge  $230 \text{ Nm}^3/\text{h} \hat{=} 1.05 \text{ Nm}^3/\text{m}_{\text{BB}}^3 \cdot \text{h}$

$\hat{=} 150.3 \text{ Nm}^3/\text{m}_0^2 \cdot \text{h}$

Beckenvolumen  $218 \text{ m}_{\text{BB}}^3$  Einblastiefe  $3.65 \text{ m}_T$

Messreihe	Datum	Versuchsbedingungen				Druck in Zu- Leitg.  cm WS	Eintragsleistung		Bemerkungen
		Wasser- temp.  °C	Luft- druck  mbar	Oberfl. spanng.  $10^{-3} \text{ N/m}$	TS - Gehalt  $\text{kg}/\text{m}_{\text{BB}}^3$		Eintrag  $\frac{\text{g O}_2}{\text{m}_{\text{BB}}^3 \text{ h}}$	Ausnützg.  $\frac{\text{g O}_2}{\text{Nm}_L^3 \cdot \text{m}_T}$	
3	2.12.81	11.4	982	66.1	1.72	380	20.46	5.32	
4	24. 3.82	12.0	984	65.1		370	17.85	4.63	
5	9. 9.82	18.9	976	70.0	3.57	395	20.80	5.40	
					Mittel 6±	381.6 12.6	19.70 1.61	5.12	

Belüftungssystem 10 A

Luftmenge  $230 \text{ Nm}^3/\text{h} \hat{=} 1.05 \text{ Nm}^3/\text{m}_{\text{BB}}^3 \cdot \text{h}$

Platten - Belüfter

Kunststoff - Folie

Beckenvolumen  $213 \text{ m}_{\text{BB}}^3$  Einblastiefe  $3.57 \text{ m}_{\text{T}}$

Messreihe	Datum	Versuchsbedingungen				Druck in Zu- leitg.  cm WS	Eintragsleistung		Bemerkungen
		Wasser- temp.  °C	Luft- druck  mbar	Oberfl. spanng.  $10^{-3} \text{ N/m}$	TS - Gehalt  $\text{kg}/\text{m}_{\text{BB}}^3$		Eintrag  $\frac{\text{g O}_2}{\text{m}_{\text{BB}}^3 \text{ h}}$	Ausnützg.  $\frac{\text{g O}_2}{\text{Nm}_{\text{BB}}^3 \cdot \text{m}}$	
8	23. 8.84	19.1	968	67.1	2.93	463	61.01	15.83	
10	25. 6.85	16.4	977	65.8	2.42	458	63.57	16.49	
					Mittel	460.5	62.29	16.16	
					$G_{\pm}$	2.5	1.81		
Flächen - Belüftung		16 Platten	$40 \text{ m}_0^2$	$5.75 \text{ Nm}^3/\text{m}_0^2 \cdot \text{h}$					
8	22.8. 84	19.0	972	64.2	2.93	455	84.96	22.04	
9	12.12.84	14.5	986	64.2	3.18	427	67.77	17.58	
10	20. 6.85	16.9	969	67.2	2.51	430	61.52	15.96	
					Mittel	437.3	71.42	18.52	
					$G_{\pm}$	12.5	12.14		

Belüftungssystem 10 B

Luftmenge  $540 \text{ Nm}^3/\text{h} \hat{=} 0.72 \text{ Nm}^3/\text{m}_{\text{BB}}^3 \cdot \text{h}$

Platten - Belüfter

$\hat{=} 6.0 \cdot \text{Nm}^3/\text{m}_0^2 \cdot \text{h}$

Kunststoff - Folie

24 Platten  $90 \text{ m}_0^2$

Beckenvolumen  $750 \text{ m}_{\text{BB}}^3$  1) Einblastiefe  $3.57 \text{ m}_T$   
 $742 \text{ m}_{\text{BB}}^3$  2)

Messreihe	Datum	Versuchsbedingungen				Druck in Zu-Leitg. cm WS	Eintragsleistung		Bemerkungen
		Wasser-temp. °C	Luft-druck mbar	Oberfl.-spanng. $10^{-3} \text{ N/m}$	TS - Gehalt $\text{kg}/\text{m}_{\text{BB}}^3$		Eintrag	Ausnützg.	
							$\frac{\text{g O}_2}{\text{m}_{\text{BB}}^3 \text{ h}}$	$\frac{\text{g O}_2}{\text{N}^3 \cdot \text{m}}$	
9	12.12.84	14.5	984	64.0	2.71	435	51.45	20.02	1)
10	25. 6.85	17.0	976	64.3	2.38	432	50.50	19.65	
					Mittel	433.5 2.1	50.98 0.45	19.83	$\alpha = 0.81$
9	7.12.84	6.0	984	73.5	Reinw.	437	66.52	25.97	2)
10	20. 6.85	16.7	966	73.5	Reinw.	435	58.87	22.97	
					Mittel G±	436 1.4	62.70 3.83	24.47	

## 5. DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Da die Untersuchungen noch nicht abgeschlossen sind, können wir nur einige vorläufige Bemerkungen zur Diskussion stellen.

Die feinblasigen Systeme mit Dom- respektive Teller - Belüftern sind bezüglich der Eintragsleistung gleichwertig. Sie unterscheiden sich im Druckverlust, der von der spezifischen Luftdurchsatzmenge  $\text{Nm}^3/\text{m}_0^2\cdot\text{h}$  und von der Struktur des Filtermaterials abhängt. Er kann stark schwanken im Laufe der Betriebszeit.

Die mittelblasigen Systeme 8 und 9 weisen signifikant schlechtere Eintragswerte auf.

Bei den Plattenbelüftern liegen die Eintragswerte 70 bis 100 % über den feinblasigen Systemen. Den höheren Eintragswerten stehen aber höhere Druckverluste gegenüber. Nach unseren bisherigen Erfahrungen liegt die Energieeinsparung bei ungefähr 30 %. Bei diesen Belüftern verfolgen wir das Betriebsverhalten im Langzeitversuch mit besonderer Aufmerksamkeit.

Auf die Störanfälligkeit der Belüfter wird im Schlussbericht über die Betriebsversuche in Altenrhein näher eingegangen.

## 6. LITERATURHINWEISE

ATV - Fachausschuss 2.6 : Arbeitsanleitung für die Bestimmung der Sauerstoffzufuhr von Belüftungssystemen in Reinwasser  
Korrespondenz Abwasser, Heft 8, 1979

HANEL Robert                      Der Sauerstoffeintrag und seine Messung beim Belebungsverfahren unter besonderer Beachtung der Viskosität und Oberflächenspannung  
Schriftenreihe Inst. für Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung der TH Darmstadt Nr. 13

KAYSER Rolf                        Ermittlung der Sauerstoffzufuhr von Abwasserbelüftern unter Betriebsbedingungen  
Veröffentlichung des Inst. für Stadtbauwesen der TH Braunschweig  
Heft 1, 1967

KELLER Urs                         Langzeitversuche mit verschiedenen Druckbelüftern und mit Luftmengenregulierung der ARA Altenrhein  
Verbandsbericht Nr. 216, 1982  
Verband Schweizerischer Abwasserfachleute

BURKHALTER Hans, Dipl. Bauing. ETH  
Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, Versuchsstation Tüffenwies, 8064 Zürich

## ERGEBNISSE VON SAUERSTOFFZUFUHRVERSUCHEN MIT VERSCHIEDENEN BELÜFTUNGSSYSTEMEN

Schlegel, S.

### 1. VORBEMERKUNGEN

Bei Belebungsanlagen wird der Reinigungseffekt in wesentlichem Umfang durch den Sauerstoffeintrag mitbestimmt. Darüber hinaus wird hierfür auch die Hauptmenge an Energie verbraucht. Infolgedessen ist es wichtig, daß der Sauerstoffbedarf richtig kalkuliert und die Leistungsfähigkeit des gewählten Belüftungssystems richtig eingeschätzt wird.

Die Berechnung des Sauerstoffbedarfes und die Dimensionierung von Belüftungssystemen ist, wie der Betrieb der Anlagen zeigt, immer noch mit einer Reihe von Unsicherheiten behaftet. Schuld hieran trägt sowohl der Gebrauch pauschaler Sauerstofflastwerte als auch die Unkenntnis in das tatsächliche Sauerstoffeintragsvermögen der gewählten Belüfter, wobei die Hersteller zwar gewisse Ertragswerte garantieren, diese jedoch immer noch auf Reinwasser und nicht auf den tatsächlichen Betriebsfall bezogen werden.

Da der Sauerstoffeintrag der verschiedenen Belüftungssysteme zumeist nicht direkt proportional zum Energieeinsatz ist, erscheint es deshalb wichtig, das Eintragsverhalten der Belüfter in Abhängigkeit von der Beaufschlagung und dem Leistungsaufwand zu kennen, damit über einen Wirtschaftlichkeitsvergleich das Minimum aus Investitions- und Betriebskosten ermittelt werden kann.

### 2. METHODEN ZUR BESTIMMUNG DES SAUERSTOFFEINTRAGES

Die Ermittlung des Sauerstoffeintrages in Reinwasser erfolgte unter Zugrundelegung der Arbeitsanleitung des ATV-FACHAUSSCHUSSES 2.6 (1979), die praktisch der ÖNORM entspricht.



Dieser Sauerstoffeintrag wird, um vergleichbare Werte zu erhalten, in spezifische Werte umgerechnet. Diese bezieht man zum einen auf das belüftete Beckenvolumen ( $g O_2/(m^3 \cdot h)$ ), zum anderen auf die aufgewendete elektrische Leistung ( $kgO_2/kWh$ ).

Die elektrische Leistung kann, insbesondere bei Versuchsanlagen, nicht immer direkt bestimmt werden. Vor allem Druckbelüftungen erfordern häufig eine gesonderte Berechnung aus der durchgesetzten Luftmenge und dem Gebläsegedruckt:

$$N_B = \frac{Q_L \cdot \gamma_w \cdot h_{ges}}{\eta \cdot 102}$$

Hierin bedeuten:

$N_B$	= Brutto-Energiebedarf	in kW
$Q_L$	= gemessene Luftmenge, umgerechnet	in $Nm^3/s$
$\gamma_w$	= spezif. Gewicht des Wassers = 1000	in $kg/m^3$
$h_{ges}$	= Gesamtgedruckt des Gebläses	in m WS
102	= Umrechnungszahl von $mkg/s$	in kW

Die Luftmengen wurden über Blendenmessungen ermittelt. Zu beachten ist ferner, daß  $h_{ges}$  nicht nur durch die Einblastiefe, sondern auch neben den Rohrleitungsverlusten durch die Austrittswiderstände der Belüfter geprägt wird.  $h_{ges}$  wurde daher bei den Versuchen durch eine Manometermessung ermittelt. Die Höhe des Wirkungsgrades  $\eta$  wurde zu 0,6 angenommen.

Die Messung des Sauerstoffeintrages unter Betriebsbedingungen und damit die des  $\alpha$ -Wertes gestaltet sich dagegen sehr viel schwieriger. Wir sind zunächst dem Vorschlag von KAISER (1980) gefolgt und haben mit dem scheinbaren Sättigungswert  $c_s^*$  gearbeitet. Dabei mußte jedoch festgestellt werden, daß durch die bei der Versuchsdurchführung zwangsweise entstehenden instationären Zustände das Zehrungsverhalten keinesfalls konstant, sondern erheblichen Schwankungen unterworfen war. Dies ergaben Zehrungsmessungen von kurz hintereinander gezogenen Proben aus einem vollkommen durchmischten Belebungsbecken. Insbesondere die empfohlene Abstellung von Abwasser und Rücklaufschlamm führte innerhalb kürzester

Zeit zu einem Rückgang des Sauerstoffbedarfes durch die Veratmung des Substrates und damit zu falschen Eintragswerten. Es wird deshalb empfohlen, für die Ermittlung des Sauerstoffeintrages von der Gleichung

$$OC = \frac{C_S}{C_S - C_X} \cdot OV \cdot f_T$$

auszugehen, bei dem OV durch eine separate Zehrungsmessung direkt aus dem Becken heraus ermittelt wird. Die Höhe von  $C_S$  wird gesondert von dem vom Belebtschlamm befreiten Abwasser, also vom Ablauf der Nachklärung, bestimmt, während  $C_X$  den Betriebswert wiedergibt. Vergleichstests mit dem davor genannten Verfahren lassen erkennen, daß diese Bestimmungsart genauer, auf jeden Fall aber schneller ist. Als nicht brauchbar hat sich die Methode erwiesen, für Zehrungsmessungen Peroxid zu verwenden, da dieses Mittel stark oxidierend wirkt. Damit kann zumindest kurzzeitig eine Beeinflussung der Atmungsaktivität nicht ausgeschlossen werden.

### 3. ERGEBNISSE VON SAUERSTOFFEINTRAGSVERSUCHEN

#### 3.1 Kreiselbelüfter

Bei der Beurteilung von Sauerstoffeintragsversuchen ist zu berücksichtigen, daß neben der Sauerstoffzufuhr auch die Aufrechterhaltung einer ausreichenden Umwälzung sichergestellt werden muß. So hat sich bei den mechanischen Oberflächenbelüftern der Einsatz von sog. Schnellläufern nicht bewährt, da sie zwar örtlich begrenzt viel Sauerstoff eintragen, aber nicht in der Lage sind, diesen auf alle Teile eines Beckens gleichmäßig zu verteilen. Ein guter Oberflächenbelüfter stellt daher immer einen Kompromiß zwischen einem Turbulenzerzeuger (Luftblaseneintrag) und einem Förderaggregat (Umwälzung) dar.

Mechanische Oberflächenbelüfter zeigen im üblichen Einsatzbereich die auf Abb. 1 dargestellte Eintragscharakteristik. Danach verbessert sich die

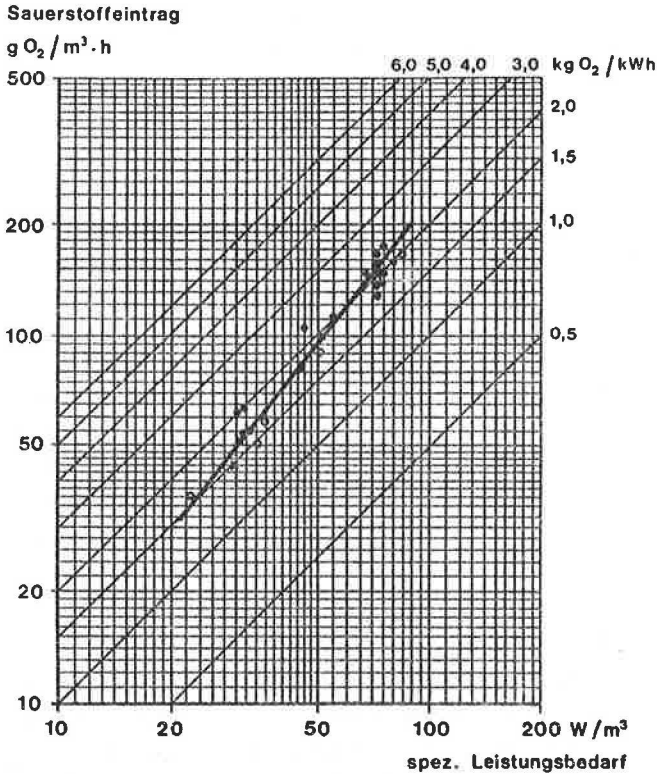


Abb. 1: Sauerstoffeintragsverhalten von 3 verschiedenen Kreisellüftern mit 3,0 bis 3,4 m Durchmesser in Reinwasser

Effizienz von Kreisellüftern mit zunehmender Leistungsdichte. Ihr Einsatz ist daher vor allem bei höher belasteten Anlagen sinnvoll. Im Durchschnitt sind Sauerstoffträge von über 2 kg O<sub>2</sub>/kWh im kommunalen Abwasserbereich nur selten realistisch. Bei schwachbelasteten Anlagen mit

vergleichsweise geringerem Sauerstoffbedarf pro  $m^3$  Beckeninhalt ist ihre Anwendung aus wirtschaftlichen Gründen kaum zu empfehlen. Doch kann hier, vor allem, wenn es sich um kleinere Anlagen handelt, aus Gründen der höheren Betriebssicherheit und geringeren Wartungsansprüche ihr Einsatz dennoch gerechtfertigt sein.

Im Zusammenhang mit der Betriebssicherheit ist darauf hinzuweisen, daß einige Oberflächenbelüfter anfällig gegenüber Verstopfungen infolge von Faserstoffen, Plastikfetzen o. ä. sind, die den Sauerstoffeintrag erheblich beeinträchtigen können. Dies ist vor allem dann zu beachten, wenn Kläranlagen - wie z.B. Stabilisierungsanlagen - ohne Vorklärung oder ausreichende Siebung des Zulaufes betrieben werden.

Oberflächenbelüfter weisen in der Regel relativ gleichbleibend hohe  $\alpha$ -Werte auf, die im Schnitt mit 0,8 und höher angesetzt werden können. Diese vielfach in der Literatur zitierten Werte konnten durch einzelne Kontrollmessungen bestätigt werden.

### 3.2 Feinblasige Druckbelüftung

Der Einsatz der feinblasigen Druckbelüftung hat in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen, da hiermit ein Instrument für einen relativ wirtschaftlichen Sauerstoffeintrag vorliegt. Bei der feinblasigen Druckbelüftung müssen jedoch im Gegensatz zu den mechanischen Oberflächenbelüftern weit mehr Parameter beachtet werden. Diese sind insbesondere

- . die spezifische Belüfterbeaufschlagung ( $Nm^3/(h.m)$  bzw.  $Nm^3/(h.Belüfter)$ )
- . die Beckenvolumenbeaufschlagung ( $Nm^3/(m^3.h)$ ) und
- . die Flächigkeit der Belüfteranordnung (%).

Darüber hinaus dürften die Porosität des Belüftermaterials, bei tieferen Becken die Einblastiefe und beim Betrieb die Belebtschlammkonzentration sowie die Zehrungsgeschwindigkeit eine Rolle spielen.

Da die bei uns laufenden Versuche bislang noch nicht abgeschlossen sind, kann eine umfassende Betrachtung und Wertung - soweit diese überhaupt möglich ist - noch nicht abgegeben werden. Die derzeit vorliegenden Ergebnisse lassen dennoch erkennen, daß es nicht damit getan ist, eine feinblasige Belüftung irgendwie zu installieren, sondern daß bei der Auslegung und Anordnung gewisse Regeln zu beachten sind, damit eine wirklich wirtschaftliche Lösung erreicht wird.

Bekannt ist die Tendenz, daß der spezifische Sauerstoffeintrag mit zunehmender Belüfterbeaufschlagung abnimmt. Die aus Abb. 2 erkennbare Abhängigkeit hat in den letzten Jahren dazu geführt, daß, um Energiekosten zu sparen, mehr in die Belüfterinstallation investiert wird. So liegt das Maximum der Auslegung von Kerzenbelüftungen heute i. a. bei 10 bis 12, das Minimum aus Gründen der gleichmäßigen Luftverteilung bei 2 bis 2,5  $\text{Nm}^3/\text{h} \cdot \text{m}$ .

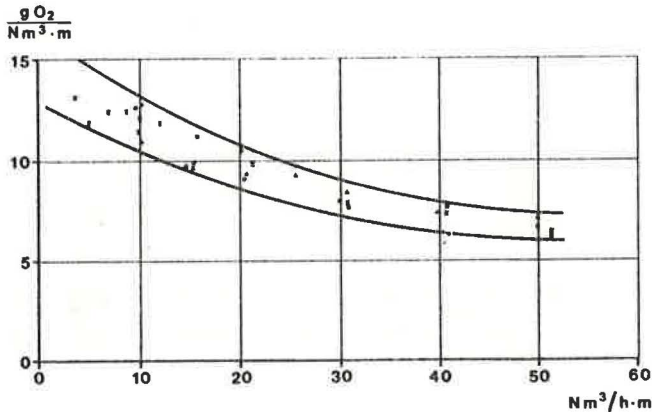


Abb. 2: Sauerstoffeintrag in Reinwasser von verschiedenen feinblasigen Rohrbelüftern in Abhängigkeit von der Belüfterbeaufschlagung bei einer Linienbelüftung

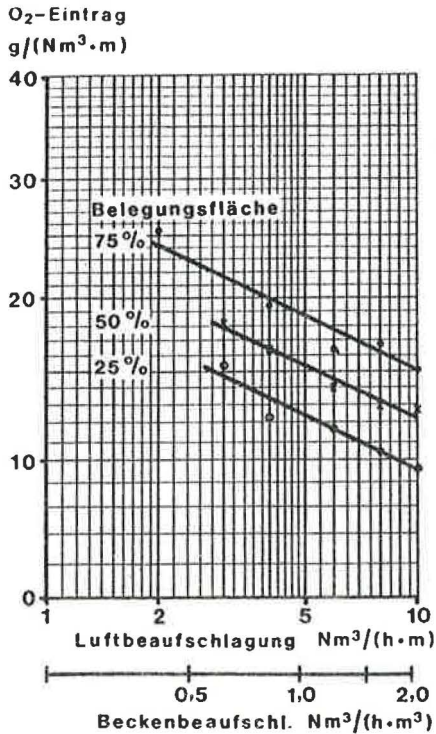


Abb. 3: Sauerstoffeintrag in Reinwasser von feinblasigen keramischen Rohrbelüftern der Fa. Didier in Abhängigkeit von der Belüfterbeaufschlagung und der prozentualen Belegungsfläche

Seit längerer Zeit besteht auch die Erkenntnis, daß der Ertrag mit zunehmender flächiger Anordnung der Diffuser an der Beckensohle günstiger wird. Beide Abhängigkeiten sind den auf Abb. 3 dargestellten Ergebnissen von Sauerstoffeintragsversuchen mit keramischen Rohrbelüftern der Firma Didier in Reinwasser zu entnehmen. Die Versuche wurden in einem Becken mit quadratischer Grundfläche bei Seitenlängen von 6 m und 4 m Beckentiefe durchgeführt. Die Resultate lassen erkennen, daß im Vergleich zu den bislang üblichen Eintragswerten nahezu doppelt so hohe Ergebniszahlen erreicht werden können. Neben der Qualität des verwendeten Filtermaterials aus echter Keramik ist hierfür auch der Effekt der Belegungsfläche ausschlaggebend.

Ein Optimum wird bei einer Belegung von etwa 75 % erzielt. Obgleich die Staffelung eigentlich erwarten ließe, daß bei einer Ausdehnung auf die gesamte Fläche des Beckenbodens der Sauerstoffeintrag noch weiter steigen müßte, zeigt sich in der Wirklichkeit kaum noch ein Anstieg, da sich das Strömungsverhalten völlig ändert. Die sonst geschlossene Strömungswalze wird dann von vielen kleinen parallelen Auf- und Abwärtsströmungen abgelöst. Hierdurch reduziert sich der Misch- und Turbulenzeffekt und somit auch der Sauerstoffübergang. Zudem steigt die Gefahr von Kurzschlußströmungen, so daß insgesamt von einer solchen Lösung abzuraten ist.

Die spezifische Volumenbeaufschlagung wurde für die Versuche so gewählt, daß sie der Realität in etwa entspricht. Dennoch ist davon auszugehen, daß mit einer Änderung dieses Parameters auch eine Änderung des Sauerstoffeintrages einhergehen wird.

Auf dem Markt werden eine Reihe unterschiedlicher Rohrbelüfter angeboten. Sie weisen je nach Material, Porosität und Qualität der Verarbeitung Unterschiede auf. Diese machen sich nicht nur beim Reinwassereintrag bemerkbar, sondern vor allem auch im Betrieb.

Neben den Rohrbelüftern finden die sog. Dom-, Platten- oder auch Punktbelüfter zunehmend Eingang auf dem Markt, da sie im Vergleich zum Rohrbelüfter noch günstigere Sauerstoffträge ermöglichen. Die auf Abb. 4 dargestellten Eintragungsergebnisse von Punktbelüftern der Firma Didier aus echter Keramik mit der Körnung 30 beweist, daß bei gleichem Material und gleicher Anordnung gegenüber dem Rohrbelüfter eine weitere Steigerung der Eintragsleistung um zumindest 10 bis 20 % möglich ist. Dieser verbesserte O<sub>2</sub>-Eintrag dürfte auf die günstigere Situation hinsichtlich des Koaleszenzverhaltens zurückzuführen sein. Zwar kommt es auch beim Punktbelüfter - vor allem bei höherer Beaufschlagung - zu der üblichen Einschnürung des Luftblasenstromes und damit zur Vereinigung von Gasblasen, doch ist die Neigung hierzu gegenüber dem Rohrbelüfter geringer.



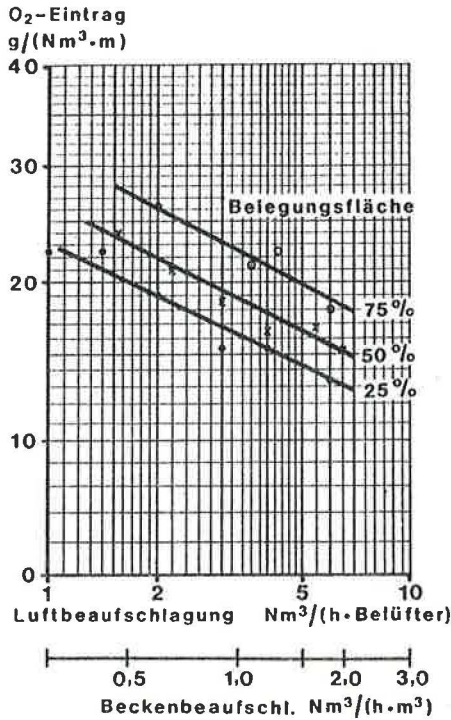


Abb. 4: Sauerstoffeintrag in Reinwasser feinblasiger keramischer Punktbelüfter der Firma Didier

Den günstigen Sauerstoffeintragungswerten entsprechend, sind die Ertragswerte ebenfalls außerordentlich hoch. Wie der Abb. 5 zu entnehmen ist, wurden bei optimaler Auslegung und Beaufschlagung mit Rohrbelüftern der Fa. Didier 3 bis 4 kg O<sub>2</sub>/kWh, mit den Punktbelüftern sogar 4 bis 5 kg O<sub>2</sub>/kWh erreicht.

Vielfach wird in der Literatur angeführt, daß bei einer feinblasigen Belüftung im Vergleich zu anderen Systemen relativ niedrige  $\alpha$ -Werte zu erwarten sind. Da der  $\alpha$ -Wert durch die Blasenkoaleszenz, die durch Oberflächenspannung und Belebtschlammkonzentration bestimmt wird, als auch die Energiedichte beeinflusst wird, kann damit gerechnet werden, daß



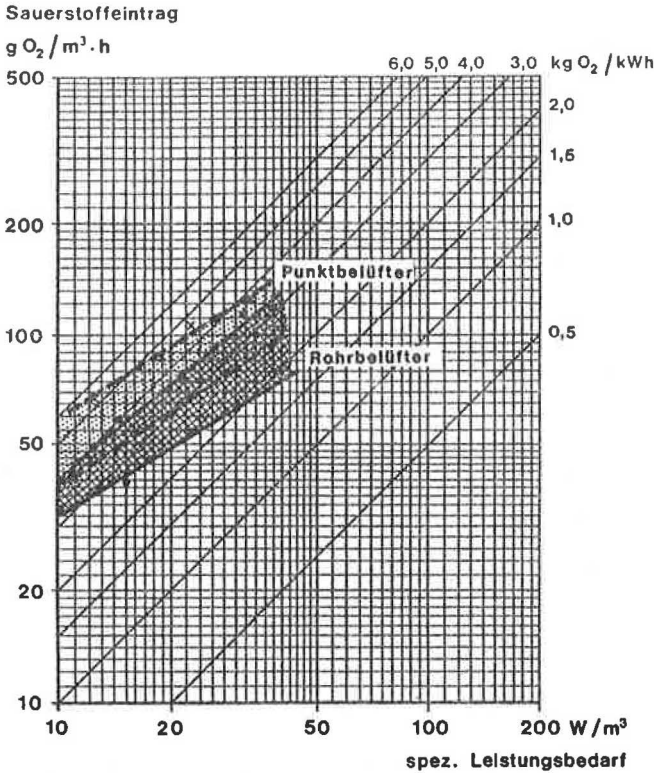


Abb. 5: Sauerstoffeintragsverhalten in Reinwasser mit feinblasigen Belüftern der Fa. Didier aus echter Keramik mit der Körnung 30

der  $\alpha$ -Wert nicht konstant, sondern variabel ist, je nachdem wie die Belüfter beschaffen sind und wie sie beaufschlagt werden. Eine Bestätigung findet sich in den auf Abb. 6 dargestellten Untersuchungsergebnissen. Bei den feinblasigen Kunststoffbelüftern der Firma Didier (Körnung 400) wurden bei höherer Beaufschlagung tatsächlich  $\alpha$ -Werte bis zu 0,5 ermittelt. Bei geringer Belastung wurden aber auch Werte erhalten, die den Ergebnissen der Reinwasserversuche entsprachen.

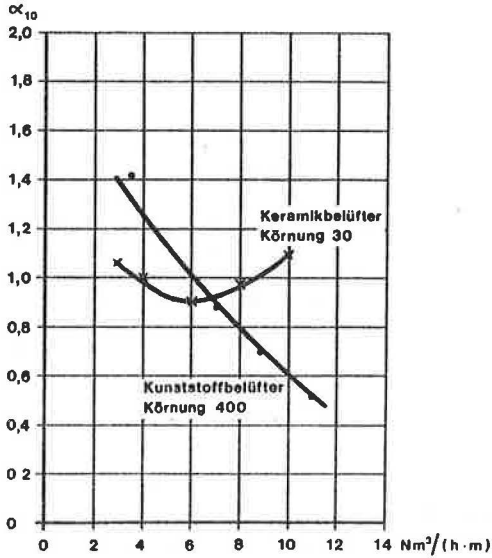


Abb. 6:  $\alpha$ -Faktoren in Abhängigkeit von der Belüfterbeaufschlagung unterschiedlicher Filterelemente

Daß das Betriebsverhalten feinblasiger Belüfter jedoch nicht einheitlich ist, zeigen die Messungen, die mit den Keramikbelüftern der Firma Didier (Körnung 30) durchgeführt wurden. Danach wichen die im Betrieb gemessenen Sauerstoffeinträge mit  $\alpha$ -Werten zwischen 0,8 und 1,1 nicht so sehr von den Reinwasserergebnissen ab. Sie stimmen übrigens auch mit den im Labormaßstab von HANEL (1984) ermittelten Resultaten recht gut überein. Die erzielten Ergebnisse lassen den Schluß zu, daß entweder das verwendete Material selbst, zumindest aber die Körnung den  $\alpha$ -Wert nachdrücklich mitbestimmen. Je feiner die Körnung, desto kleiner die Luftblasen, desto geringer der Abfall des  $\alpha$ -Wertes. Der bei höherer Beaufschlagung erkennbare Anstieg des  $\alpha$ -Faktors läßt sogar vermuten, daß bei ausreichend kleinen Gasblasen mit höherer Energiedichte die Transportsituation der Reaktionspartner so weit verbessert wird, daß die negativen Folgen der Blasenkoaleszenz mehr als aufgehoben werden.

Feinblasige Belüfter neigen naturgemäß zur Verstopfungen der Poren der Filterelemente. Die Verstopfungsgefahr von innen kann durch gute Filtration der angesaugten Luft, Anwendung ölfreier Luftverdichter und Verlegung eines korrosionsfreien Luftverteilungssystems vom Gebläse zu den Belüftungselementen minimiert werden. Von außen wird das Zusetzen durch eine gute Vorklärung und Vermeidung von Betriebsunterbrechungen so gut als möglich verhindert (PÖPEL, 1984). Dennoch muß von Zeit zu Zeit eine Reinigung der Belüfter erfolgen. Dieses ist jedoch kein Unglück, sondern muß als eine zum normalen Betrieb gehörende Wartungsaufgabe angesehen werden, wie z.B. das Abschmieren einer Maschine.

Parallel durchgeführte Vergleichstests über die Verstopfungsanfälligkeit verschiedener feinblasiger Belüfter über mehrere Jahre ergaben für die verschiedenen Belüfterarten unterschiedliche Standzeiten. Am anfälligsten waren reine Kunststoffbelüfter, gefolgt von Keramikbelüftern mit einer Kunststoffbindung. Am besten haben die reinkeramischen Belüfter abgeschnitten, die gegenüber den erstgenannten bis über viermal längere Standzeiten aufwiesen. Mit den keramischen Belüftern wurde auch die Erfahrung gemacht, daß nach dem ersten Reinigungsvorgang die nächste Betriebsunterbrechung erst sehr viel später erfolgen mußte. Es handelt sich dabei zumeist um Zeiträume von mehreren Jahren.

Die Lebensdauer von Kunststoffbelüftern wird zudem durch Lösungsmittel, die sich leider immer wieder - wenn auch in kleinen Mengen - im Zulauf zu den meisten Kläranlagen befinden, beeinträchtigt. Hierdurch kann es im Laufe der Zeit zu immer häufiger auftretenden Brüchen der Filterkerzen kommen, die wiederum Betriebsunterbrechungen erzwingen.

Nicht verstopfungsanfällig sind die zuletzt auf den Markt gekommenen Gummimembranbelüfter. Diese haben jedoch andere Nachteile. Sie bestehen darin, daß die Gummimembranen mehr oder weniger schnell die Elastizität verlieren und sich auszuweiten beginnen. Der Effekt einer feinblasigen Belüftung wird hierdurch hinfällig. Die Belüftung wird mittel- bis grobblasig mit einem entsprechenden Rückgang des Sauerstoffeintragsver-

mögens. So wurde z.B. innerhalb eines halben Jahres ein Rückgang des Sauerstoffertes um rd. 30 % festgestellt. Es ist daher kaum vorstellbar, daß unter solchen Bedingungen die Gummimembranbelüfter auf Dauer eine wirtschaftliche Alternative zum Keramikbelüfter darstellen.

### 3.3 Strahldüsen

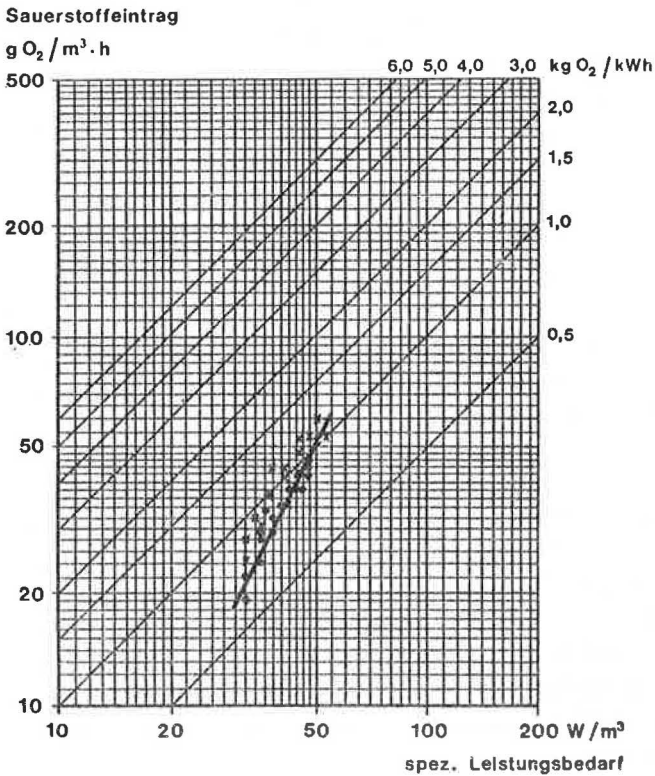


Abb. 7: Sauerstoffeintragsverhalten in Reinwasser (●) und Abwasser (x) einer BASF-Strahldüse mit 40 mm  $\phi$  bei einer Wassertiefe von 4,5 m.

Aufgrund der überaus positiven Darstellung des Sauerstoffeintrages durch Ejektoren, Injektoren und Strahldüsen (ZLOKARNIK, 1980), haben wir Sauerstoffeintragsversuche mit der BASF-Strahldüse durchgeführt. Wohl wissend, daß solche Zweistoffdüsen ihr Optimum erst bei größeren Wassertiefen erreichen, erschien dennoch die Möglichkeit, Umwälzung und Belüftung bis zu einem gewissen Grade voneinander zu trennen, um z.B. zu denitrifizieren, Grund genug zu bieten, dieses Verfahren auf seine Wirtschaftlichkeit hin zu untersuchen.

Zweistoffdüsen werden in der Regel mit konstantem Treibwasserstrahl und variabler Luftmenge betrieben. Die mit einer solchen Düse erzielten Eintragswerte sind der Abb. 7 zu entnehmen. Die Darstellung zeigt, daß mit zunehmendem Luftzusatz der Sauerstoffeintrag ansteigt. Darüber hinaus wird bestätigt, daß durch das verminderte Koaleszenzverhalten bei Abwasser ein etwas besserer Sauerstoffübergang und damit über 1 liegende  $\alpha$ -Werte erzielt werden.

#### 3.4 Kombination aus Kreiselbelüftung und Begasung mit reinem Sauerstoff

Der besondere Vorteil dieses Systems beruht darauf, daß durch den Einsatz einer zusätzlichen Sauerstoffbegasung der Sauerstoffeintrag wesentlich gesteigert werden kann, ohne daß die Belüfterleistung der Kreisel über das Niveau der installierten Leistung hinaus angehoben werden muß.

Um das Sauerstoffeintragsverhalten dieses Kombisystems zu untersuchen, wurden Eintragsversuche durchgeführt, bei denen die Parameter Schlauchbeschickung ( $\text{Nm}^3/\text{h} \cdot \text{m}$ ), spez. Sauerstoffzufuhr ( $\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$ ) und Leistungsdichte ( $\text{W}/\text{m}^3$ ) variiert wurden. Nach den auf Abb. 8 dargestellten Versuchsergebnissen wird der Sauerstoffeintrag dieses Belüftungssystems von der Höhe der zugeführten Sauerstoffmenge und in ganz erheblichem Maße auch durch die Belüfterleistung mit bestimmt. Der Einfluß der Schlauchbeschickung, die im Bereich zwischen 0,2 und 0,8  $\text{Nm}^3/\text{h} \cdot \text{m}$  lag, war dagegen relativ unbedeutend.

Ohne den Betrieb der Kreiselbelüfter wurden ca. 30 bis 35 % des zugeführten Sauerstoffes direkt eingetragen. Durch die Anhebung der Belüfterleistung und der damit verbundenen besseren Durchmischung des

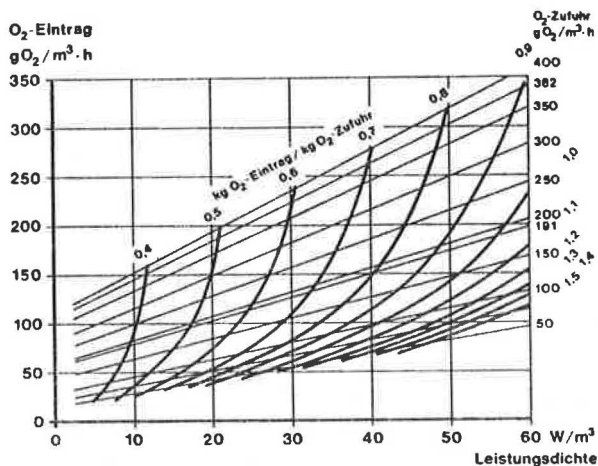


Abb. 8: Sauerstoffeintrag des Kombisystems aus Kreislaufbelüftung und Sauerstoffbegasung in Abhängigkeit von der Leistungsdichte und der Sauerstoffzufuhr

Beckeninhaltes bzw. der verlängerten Verweilzeit des gasförmigen Sauerstoffes im Wasser läßt sich der Ausnutzungsgrad jedoch erheblich verbessern.

Da die Versuche mit einem offenen Becken durchgeführt wurden, trug der Kreislaufbelüfter auch Luftsauerstoff ein. Dies erklärt die über 1,0 liegenden Verhältniszahlen. Bei gasdichten Becken kann dagegen maximal nur der zugeführte reine Sauerstoff verwertet werden. Das führt bei hohen Belüfterleistungen zu Sauerstoffgehalten in der Beckenatmosphäre, die unterhalb dem  $O_2$ -Gehalt von Luft liegen können. In einem solchen Fall ergibt sich für den Kreislaufbelüfteranteil ein verminderter Ertragswert. Andererseits geht beim offenen Becken mit zunehmender Sauerstoffzufuhr und abnehmender Belüfterleistung in steigendem Maße Sauerstoff verloren, der durch eine Abdeckung aufgefangen wird.

#### 4. VERGLEICHSBETRACHTUNGEN

Weil die Wirtschaftlichkeit im Vordergrund steht, ist für einen Vergleich der einzelnen Systeme der spezifische Leistungsbedarf, also der auf die Kilowattstunde bezogene Sauerstoffbedarf, von besonderem Interesse. Die auf Abb. 9 dargestellte Übersicht läßt zweifelsfrei erkennen, daß beim Sauerstoffeintrag in Reinwasser die feinblasige Belüftung den anderen Belüfterarten weit überlegen ist, wenn diese ausreichend gering beaufschlagt und flächig angeordnet ist. Dabei werden Sauerstoffträge von über 3 kg O<sub>2</sub>/kWh erreicht. Die Kurve zeigt eine vom Ertrag her gesehen fallende Tendenz mit zunehmender Durchsatzleistung. Können diese optimalen Bedingungen nicht eingehalten werden, sinken auch die Erträge.

Sie nähern sich dann dem Eintragsniveau der Kreiselbelüfter, mit denen sich pro kWh nur 1,5 bis 2,5 kg O<sub>2</sub> eintragen lassen. Bei diesem Belüftertyp geht mit steigender Leistung allerdings eine Verbesserung des Ertrages einher. Es kann somit bei hohem Sauerstoffbedarf der Kreiselbelüfter der feinblasigen Belüftung durchaus ebenbürtig, bei Systemen, die niedrige  $\alpha$ -Werte bei hohen Luftdurchsätzen erreichen, sogar überlegen sein. Bei niedrig belasteten Kläranlagen, die in zunehmendem Maße gebaut werden, erscheint jedoch die feinblasige Belüftung in jedem Falle vorteilhaft, zumal, wenn Belüfter gewählt werden, mit denen  $\alpha$ -Werte in einer mit Oberflächenbelüftern vergleichbaren Größenordnung erzielt werden.

Die Strahldüsenbegasung dürfte dagegen bei konventioneller Bauweise, bei der Beckentiefen von 6 m kaum überschritten werden, aufgrund der schlechten Ertragssituation auch in der Zukunft kaum einen nennenswerten Einsatz finden, auch wenn  $\alpha$ -Werte erreicht werden, die etwas oberhalb von 1,0 liegen. Die Erträge mit Werten von nur selten mehr als 1 kg O<sub>2</sub>/kWh gleichen übrigens denen von üblichen Tauchbelüftern. Die relativ schlechten Erträge sind offensichtlich auf die hohen Strömungsverluste an

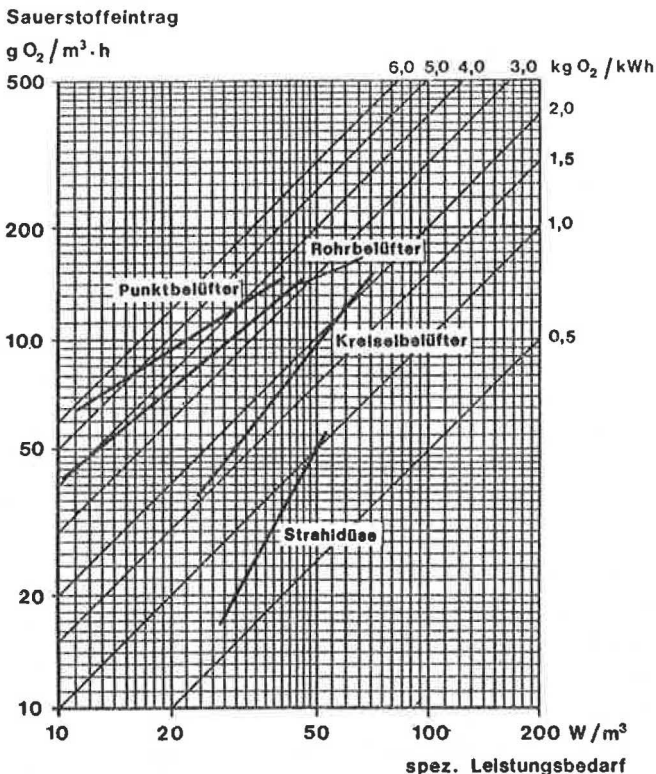


Abb. 9: Vergleich des Sauerstoffeintragsverhaltens verschiedener Belüftungssysteme bei rd. 4 m Wassertiefe

den Düsen zurückzuführen. Hierdurch werden zwar sehr feine Gasblasen erzeugt, doch reicht bei nicht genügender Beckentiefe die größere Oberfläche des Gasblasenstromes nicht aus, den Mehraufwand an Energie zu kompensieren.

Bei der vorgestellten Kombination aus Kreisbelüftung und Sauerstoffbegasung war nur ein Vergleich über die Kosten möglich. Dieser ergab, daß es in jedem Fall günstiger ist, die Kreisbelüfter mit möglichst hohem Energieaufwand zu betreiben, da die Stromkosten an den Gesamtkosten einen weit geringeren Anteil haben als die Kosten für den Bezug des Sauerstoffes. Mit steigenden Einsatzmengen ist infolge des Anstieges der Sauerstoffverluste mit einer Zunahme der Gesamtkosten zu rechnen, der



sich um so stärker auswirkt, je höher die Sauerstoffkosten sind. Es handelt sich also hierbei keineswegs um eine kostengünstige Alternative in Bezug auf den Sauerstoffeintrag. Wenn allerdings mit dieser Lösung auf eine Abluftbehandlung verzichtet werden kann, mag sie dennoch wirtschaftlich vertretbar sein.

Aufgrund der Vielfältigkeit der Belüfterarten war es nur möglich, einen gewissen Überblick über einige Systeme zu geben. Gerade auf dem Gebiet der feinblasigen Belüftung wird eine Vielzahl von Produkten angeboten, die kaum noch zu überschauen ist. Dennoch zeigen die bisherigen Tests, daß das vorgestellte Produkt vergleichsweise optimale Ertragswerte liefert.

Zu erwähnen ist, daß durch die Trennung von Belüftung und Umwälzung ebenfalls günstige Sauerstoffträge erreicht werden können.

Bei den mechanischen Oberflächenbelüftern sind auch die Stabwalzen zu nennen, die nach wie vor ihren Einsatz finden, die aber von uns nicht untersucht wurden.

Auf dem Gebiet der Zweistoffdüsen gibt es ebenfalls eine Reihe unterschiedlicher Produkte. Sie werden jedoch zumeist im industriellen Bereich verwendet, wo andere Randbedingungen wie z.B. fehlender Baugrund und Geruchsprobleme, die Kosten-Nutzen-Rechnung mitbestimmen.

5. LITERATURHINWEISE

- n. n.                   Arbeitsanleitung für die Bestimmung der  
Sauerstoffzufuhr von Belüftungssystemen in  
Reinwasser.  
Korrespondenz Abwasser 26 (1979) 8, S. 416
- HANEL, R.               Experimente zur Ermittlung von Sauerstoff-  
eintragsfaktoren d. Korrespondenz Abwasser 31  
(1984) 2, S. 118
- KAISER, R.              Weiterentwicklung der Methoden zur Messung der  
Sauerstoffzufuhr unter Betriebsbedingungen.  
Berichte aus Wassergütewirtschaft und  
Gesundheitsingenieurwesen, Technische  
Universität München Bd. 28 (1980), S.29
- PÖPEL, H.J.             Entwicklungstendenzen der Belüftung beim  
Belebungsverfahren.  
Wasser und Boden 36 (1984) 5, S. 206
- ZLOKARNIK, M.         Eignung und Leistungsfähigkeit von  
Volumenbelüftern für biologische  
Abwasserreinigungsanlagen.  
Korrespondenz Abwasser 27 (1980) 3, S. 194

Dr.-Ing. Sigurd Schlegel  
Emschergenossenschaft/Lippeverband  
Kronprinzenstraße 24  
D 4300 Essen 1



ERGEBNISSE VON SAUERSTOFFZUFUHRVERSUCHEN  
MIT VERSCHIEDENEN BELÜFTUNGSSYSTEMEN

E. MAYR

Im Jahre 1976, als in Oberösterreich begonnen wurde, die Sauerstoffeintragsleistung von Belüftern zu messen, waren vor allem Probleme mit der Sauerstoffversorgung bestehender Anlagen und die Vermutung überhöhter Angaben von Eintrag und Ertrag für Belüfter der Anlaß, durch Sauerstoffzufuhrversuche in Reinwasser die Leistungsfähigkeit verschiedener Belüftungssysteme zu messen und die Einhaltung von Garantien zu überprüfen. In den letzten Jahren standen neben den Garantieüberprüfungen wirtschaftliche Aspekte im Vordergrund, da von den Anlagenbetreibern über hohe Energiekosten geklagt wurde.

Im folgenden soll über das Ergebnis von Sauerstoffeintragsmessungen in 42 Kläranlagen berichtet werden, wobei über hundert Einzelmessungen ausgewertet wurden. Es kann sich dabei jedoch naturgemäß nicht um eine wissenschaftliche Untersuchung, sondern nur um die Auswertung von in der Praxis gewonnenen Daten handeln.

## 1. OBERFLÄCHENBELÜFTUNG

### 1.1 Rotoren

Untersucht wurden 13 Kläranlagen, welche mit drei verschiedenen Belüfterfabrikaten mit geringfügig unterschiedlichen Durchmesser ausgerüstet waren. Ausgewertet wurden 29 Messungen (Tab. 1 - 4). Neben der Auswertung über alle Meßdaten wurde auch zwischen den Eintauchtiefen 15 - 25 und 26 - 33 cm unterschieden.

Berücksichtigt man bei der Auswertung unübliche Belüfteranordnungen bzw. Sonderfälle nicht, ergibt sich ein durchschnittlicher Ertrag von 1,65 kg O<sub>2</sub>/kWh mit einem Schwankungsbereich von 1,33 bis 2,08 kg O<sub>2</sub>/kWh, wobei der

bekanntem Zusammenhang zwischen Energiedichte ( $\text{W/m}^3$ ) und Ertrag ( $\text{kg O}_2/\text{kWh}$ ) gefunden wurde (Abb. 1 - 3).

Der Einbau von Leit- und/oder Bremswänden ist zur Erreichung eines entsprechenden Ertrages erforderlich.

Beckenform und Belüfteranordnung können von entscheidendem Einfluß sein. Keine Erhöhung des Ertrages, sondern vielmehr dessen Gegenteil wird bewirkt, wenn Rotoren so angeordnet sind, daß sie in die Kurven von Umlaufbecken arbeiten und, wie in einem Fall, auch keine Leitwände vorhanden sind (E,K).

Von Interesse sind zwei Versuche mit Systemen, welche der Senkung des Energiebedarfes für die Belüftung generell, vor allem aber in Schwachlastzeiten dienen. In einer Kläranlage waren zwei von drei Rotoren mit polumschaltbaren Motoren ausgestattet (N4). Der erzielte Ertrag war mit  $0,42 \text{ kg O}_2/\text{kWh}$  sehr niedrig. Setzt man zur Umwälzung nur einen der beiden Rotoren ein, ergibt sich ein spezifischer Energiebedarf für die Umwälzung von  $14,7 \text{ W/m}^3$ . Die zweite Kläranlage war für die Umwälzung mit einem schnellaufenden Propeller mit einer Leistungsaufnahme von  $5,1 \text{ kW}$  ausgerüstet, woraus sich ein spezifischer Energiebedarf von  $4,6 \text{ W/m}^3$  errechnet. Würde man den Propeller gemeinsam mit zwei Rotoren betreiben, ergäbe sich keine Verbesserung des Ertrages, sondern vielmehr eine Verringerung von  $1,59$  auf  $1,45 \text{ kg O}_2/\text{kWh}$ . Wird eine intermittierende Belüftung angestrebt, ist ein Umwälzpropeller Rotoren mit polumschaltbaren Motoren eindeutig vorzuziehen. Zudem könnte die spezifische Umwälzenergie auf  $2 - 3 \text{ W/m}^3$  reduziert werden, ohne daß Ablagerungen zu befürchten sind.

### 1.2 Stabwalzen

Untersucht wurden zwei Kläranlagen, welche mit Stabwalzen, Durchmesser  $70 \text{ cm}$ , ausgerüstet sind und fünf Messungen ausgewertet (Tab. 5). Auch für Stabwalzen gilt, daß mit steigender Energiedichte der Ertrag sinkt und der Einbau von Leitwänden eine Erhöhung des Ertrages und der spezifi-

schen Zufuhr bewirkt. Der durchschnittliche Ertrag liegt bei 1,53 kg O<sub>2</sub>/kWh (1,34 bis 1,80 kg O<sub>2</sub>/kWh). Die spezifische Zufuhr beträgt im Mittel 4,37 kg O<sub>2</sub>/m.h (3,75 bis 5,29 kg O<sub>2</sub>/m.h).

### 1.3 Kreisel

Untersucht wurden zwei Kläranlagen und acht Messungen ausgewertet (Tab. 6). Es wurde ein durchschnittlicher Ertrag von 1,60 kg O<sub>2</sub>/kWh (1,48 bis 1,71 kg O<sub>2</sub>/kWh) ermittelt. Für beide Kläranlagen konnte kein linearer Zusammenhang zwischen Energiedichte und Ertrag gefunden werden.

## 2. DRUCKLUFTBELÜFTUNG

Untersucht wurden 22 Kläranlagen, davon neun mit feinblasiger und zwölf mit mittelblasiger Belüftung mit und ohne zusätzliche Umwälzeinrichtungen. Ausgewertet wurden 54 Messungen.

### 2.1 Mittelblasige Belüftung

#### 2.1.1 Linien- und Flächenbelüftung ohne Umwälzung

Die Auswertung von 17 Messungen in sechs Kläranlagen ergibt aufgrund von stark unterschiedlichen Bedingungen und Voraussetzungen ein nicht sehr einheitliches Bild (Tab. 7 - 9), obwohl alle Kläranlagen mit demselben Belüfter (Schaumstoffbelüfter) ausgerüstet sind. In einer Kläranlage konnte unter gleichen Bedingungen ein Vergleich Schaumstoffbelüfter - Schlauchbelüfter - Gummimembran-Tellerbelüfter erfolgen.

Während zwischen Belüfterbeaufschlagung und Ertrag ein guter Zusammenhang besteht, gilt dies nur bedingt zwischen Beaufschlagung und Ausnutzung. Die Erklärung dafür liegt u.a. in erheblichen Unterschieden in der Turbulenz und soll an Hand von Messungen an einer Kläranlage dargestellt werden. Bedingt durch die Nichterfüllung abgegebener Garan-

tien für Eintrag und Ertrag wurde die Belüftungseinrichtung mehrmals umgebaut und bei einigen Versuchen eine zusätzliche Umwälzung mit einer Leistungsaufnahme von 14,4 kW, das sind  $18,3 \text{ W/m}^3$ , eingesetzt. Die einzelnen Versuchsanordnungen und Meßergebnisse sind in Tabelle 7 und 10 enthalten. Daraus geht hervor, daß sich bei gleicher Beaufschlagung und gleichem Leistungsbedarf Eintrag, Ertrag und Ausnutzung um rund 33 % erhöht haben. Weiters ist zu ersehen, daß durch den Einsatz eines entsprechend starken Umwälzaggregate (14,4 kW) bei gleicher Beaufschlagung Eintrag und Ausnutzung um rund 23 % erhöht werden konnte, der Ertrag jedoch faktisch gleich blieb. Vergleicht man bei gleicher Beaufschlagung Flächenbelüftung mit und ohne Umwälzung, sieht man, daß Eintrag und Ausnutzung gleich sind, der Ertrag jedoch durch das zusätzliche Umwälzaggregate um rund 25 % vermindert wurde. Bei erhöhter Beaufschlagung beträgt die Steigerung bei Eintrag und Ausnutzung statt 33 % nur mehr 17,5 %. Der Ertrag ist, bedingt durch neue E-Motoren mit besserem Wirkungsgrad um 23 % höher.

Betrachtet man die Ergebnisse in ihrer Gesamtheit, sind starke Abhängigkeiten von Einblastiefe, Beckenform, Rotor- und Gebläsewirkungsgrad und Turbulenz festzustellen. Langgestreckte Rechteckbecken (B,F) mit ungleicher Luftverteilung und große Einblastiefe (B) ergeben Verminderungen bei Ertrag und Ausnutzung. Negativ auf den Ertrag wirkt sich der Einsatz polumschaltbarer E-Motoren mit kleiner Drehzahl aus (C,F).

Unter Berücksichtigung aller Meßwerte (ohne Umwälzung) ergibt sich ein durchschnittlicher Ertrag von  $1,66 \text{ kg O}_2/\text{kWh}$  mit Schwankungen zwischen 1,2 und  $2,49 \text{ kg O}_2/\text{kWh}$ . Die durchschnittliche Ausnutzung liegt bei  $9,1 \text{ g O}_2/\text{m}^3 \cdot \text{m}_{\text{ET}}$  mit Schwankungen von 6,2 bis  $11,8 \text{ g O}_2/\text{m}^3 \cdot \text{m}_{\text{ET}}$  (Abb. 4, 5).

Probleme mit Belüftern an einer Kläranlage brachten die Möglichkeit, verschiedenen Belüfter - Schlauchbelüfter - Schaumstoffbelüfter und Gummimembran-Fellerbelüfter - unter

annähernd gleichen Bedingungen zu messen und zu vergleichen. Allerdings mit der Einschränkung, daß Luftmenge und Belüfteranzahl gegenüber der Erstausrüstung mit Schlauchbelüftern nicht verändert werden konnten. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 dargestellt. Die wesentliche Aussage besteht darin, daß die Gummimembran-Fellerbelüfter wesentlich bessere Werte für Eintrag, Ertrag und Ausnutzung erbracht haben und eigentlich der feinblasigen Belüftung zuzurechnen sind.

### 2.1.2. Flächenbelüftung (mit Umwälzung)

Der Auswertung liegen 14 Messungen in sechs Kläranlagen zugrunde (Tab. 12, 13).

Wenngleich das Konzept dieser Anlagen vor allem auf die Trennung von Belüftung und Umwälzung hinzielt, ist von Interesse, ob bei Simultanstabilisierungsanlagen durch zusätzliche Umwälzung im Vergleich zur Flächenbelüftung bei Ertrag und Ausnutzung eine Verbesserung zu erzielen ist. Die durchschnittliche Ausnutzung erhöht sich von 8,7 auf 9,5 g O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>·m<sub>ET</sub> um 9,2 %, der durchschnittliche Ertrag von 1,54 auf 1,64 kg O<sub>2</sub>/kWh um 6,5 % (Abb. 6 - 8). Dies bedeutet, daß neben dem Vorteil der intermittierenden Belüftung durch getrennte Umwälzung auch eine Verbesserung bei Ausnutzung und Ertrag erzielt wird. Die erforderliche Umwälzenergie liegt bei nur etwa 2,5 - 3,0 W/m<sup>3</sup>, wodurch im Gegensatz zu der unter 2.1.1 beschriebenen Kläranlage (A) mit einer Umwälzenergie von 18,3 W/m<sup>3</sup> nur geringe zusätzliche Turbulenz mit Grenzflächenerneuerung wirksam wird. Umwälzaggregate mit hoher spezifischen Leistung würden aber die Wirtschaftlichkeit dieses Belüftungssystems mehr als in Frage stellen, da die Energieeinsparung bei abgestellter Belüftung zu gering wäre.

Von einer etwas ausgefallenen und in der Praxis kaum denkbaren Variante soll noch kurz berichtet werden. Eine Kläranlage (D), welche mit zwei Stabwalzen als Belüfter ausgerüstet war, wurde auf Druckluftbelüftung mit Schaumstoffbelüftern umgerüstet. Zum Zeitpunkt der Sauerstoffeintrags-



messung waren die Stabwalzen noch nicht demontiert, sodaß eine Messung Druckluft plus Stabwalzen durchgeführt werden konnte. Einer Erhöhung des Eintrages von 38,7 auf 54,6 kg O<sub>2</sub>/h steht eine Verminderung des Eintrages von 1,46 auf 1,37 kg O<sub>2</sub>/kWh gegenüber.

## 2.2 Feinblasige Belüftung

Die Auswertung von 18 Messungen in neun Kläranlagen ergibt auf den ersten Blick ein ähnlich uneinheitliches Bild wie bei der mittelblasigen Belüftung (Tab. 14, 15; Abb. 9). Betrachtet man jedoch die Ergebnisse im Detail, sind gute Zusammenhänge bzw. Unterschiede bei Ausnutzung und Ertrag in Abhängigkeit von Belüfteranordnung, Belüfterart, Gebläsetype und Art des Antriebes festzustellen (Abb. 10 - 13).

Feinblasige Teller-Belüfter bringen im Mittel einen um rund 14 % besseren Ertrag als Kerzenbelüfter, beide flächig angeordnet (Abb. 10, 12). Auch die durchschnittliche Ausnutzung ist im gleichen Ausmaß verbessert, sinkt jedoch mit höherer Beaufschlagung bei Teller-Belüftern stärker ab als bei Kerzenbelüftern (Abb. 11, 13).

Vergleicht man weiters bei Kerzenbelüftern Flächen- und Linienbelüftung (Abb. 10, 11), ist festzustellen, daß die Ausnutzung bei der Linienbelüftung um rund 27 % geringer ist als bei der Flächenbelüftung. Der Ertrag ist nur um etwa 6 % geringer. Dies ist auf den besseren Wirkungsgrad der Turbogebläse zurückzuführen, welche für die Linienbelüftung eingesetzt wurden.

Bei der Teller-Belüftung läßt sich sehr gut der Einfluß von schlechten Motorwirkungsgraden auf den Ertrag nachweisen. Eine Verminderung des Ertrages in der Größenordnung von über 10 % kann die Folge von unzureichender Abstimmung Motor - Gebläse, überdimensionierten E-Motoren oder E-Motoren mit schlechten Wirkungsgrad sein (Abb. 12).

Bezüglich Ausnutzung wären auch die Gummimembran-Tellerbelüfter zur feinblasigen Belüftung zu zählen (Abb. 13).

Der Ertrag liegt jedoch deutlich niedriger (Abb. 12). Wieweit diese eine Messung repräsentativ ist, kann nicht gesamt werden. Die Werte würden sich jedoch gut in die gesamte Auswertung einfügen.

Gesondert eingegangen werden soll noch auf zwei Messungen in einer Kläranlage, in welcher eine Tellerflächenbelüftung (Teilauslegung) mit getrennter Umwälzung kombiniert wurde. Hier ist vor allem der Vergleich mit gleichartigen Anlagen mit mittelblasiger Belüftung von Interesse. Die Gegenüberstellung zeigt eine Steigerung bei Ertrag und Ausnutzung von über 60 %. Diese Belüftungsanordnung ermöglicht eine simultane Denitrifikation, ein intermittierender Betrieb erscheint nach allgemeiner Ansicht bei dieser Art von Belüftern nicht möglich. Derzeit laufen Versuche, ob und unter welchen Voraussetzungen nicht doch ein intermittierender Betrieb möglich ist. Würde sich eine technisch einwandfreie und einfache Lösung ergeben, könnte die Wirtschaftlichkeit doch wesentlich erhöht werden.

Zur Frage der Verstopfung von feinblasigen Belüftern ist zu berichten, daß bislang nur auf Grund von Fehlern im Betrieb Probleme bei zwei Anlagen aufgetreten sind und durch Dosierung von Ameisensäure behoben werden konnten.

Einen Überblick über die gesamten Meßergebnisse für Druckluftbelüftungen gibt Abb. 14, aus welcher die Größenordnungen für den Ertrag in Abhängigkeit von der Beaufschlagung ersichtlich sind.

### 3. JET-BELÜFTUNG

Es liegen nur zwei Messungen an einer Kläranlage vor, welche auf Grund der für diese Belüftung geringen Einblasentiefe von 3,3 m nur beschränkt aussagekräftig sein können. Die ermittelten Werte für den Ertrag mit 1,47 und 1,64 kg O<sub>2</sub>/kWh und die Ausnutzung mit 10,9 und 10,3 g O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>·m<sub>ET</sub> liegen im Bereich der mittelblasigen Druckbelüftung bzw. von Oberflächenbelüftern (Tab. 16).

#### 4. SUBMERS-REAKTOR

Für den Submers-Reaktor liegen sieben Messungen in zwei Kläranlagen vor. Der durchschnittliche Ertrag wurde mit 1,88 kg O<sub>2</sub>/kWh gemessen bei einem Schwankungsbereich von 1,67 bis 2,12 kg O<sub>2</sub>/kWh. Dieses Belüftungssystem ist somit auch der mittelblasigen Druckbelüftung bzw. der Oberflächenbelüftung vergleichbar (Tab. 16).

#### 5. ZUSAMMENFASSUNG

Zusammenfassend werden die durchschnittlichen Ertragswerte der einzelnen Belüftungssysteme bzw. Belüfter gegenübergestellt, wobei solche vereinfachenden Aussagen eigentlich nicht getroffen werden dürften, da dadurch die in Wirklichkeit doch komplizierten Zusammenhänge untergehen.

<u>Belüftung</u>	<u>Ertrag kg O<sub>2</sub>/kWh</u>
<u>Rotoren:</u>	1,66
<u>Stabwalzen:</u>	1,53
<u>Kreisel:</u>	1,60
<u>Druckluft mb:</u>	
Schaumstoff: Fläche	1,66
Linie	1,56
<u>Druckluft fb:</u>	
Tellerbelüftung: Fläche	3,57
Kerzenbelüftung: Fläche	3,05
Linie	2,85
<u>Druckluft + Umwälzung:</u>	
mittelblasig, Schaumstoff	1,64
feinblasig, Teller	2,64
<u>JET-Belüftung:</u>	1,55
<u>Submers-Reaktor:</u>	1,88

Von Fachleuten wird immer wieder auf die Problematik der Aussagekraft von Reinwassermessungen für den Betrieb von Kläranlagen hingewiesen. Grundsätzlich mag dies durchaus richtig sein, doch kann eine Garantie für die Leistung eines Belüftungssystems nur unter definierten Bedingungen abgegeben und überprüft werden. Alleine aus diesen Gründen kann auf Reinwassermessungen nicht verzichtet werden. Ob und inwieweit man diese Ergebnisse für die Beurteilung unter Betriebsbedingungen heranzieht ist allerdings eine andere Sache. Entscheidend ist natürlich, was leistet ein Belüftungssystem unter Betriebsbedingungen. Eine Möglichkeit, eine gewisse Aussage darüber zu erhalten ist, das Belüftungssystem unter Betriebsbedingungen zu messen.

#### MESSUNGEN UNTER BETRIEBSBEDINGUNGEN

Es wurden bisher in Oberösterreich an insgesamt 8 Kläranlagen Belebtschlammessungen nach den Methoden von Prof. Kayser durchgeführt. Nach der Methode über die Atmung wurden durchwegs reproduzierbare Werte erhalten. Bei der Peroxid-Methode sind Probleme mit der Reproduzierbarkeit aufgetreten, wobei gegenüber der Atmungsmethode unter gleichen Bedingungen höhere bzw. niedrigere Werte erhalten wurden. Grundsätzlich ist aus unserer Sicht festzustellen, daß Messungen unter Betriebsbedingungen eine Reihe von Problemen aufwerfen, auf welche hier jedoch nicht näher eingegangen werden kann und an sich bekannt sind.

Die Kläranlagen wurden so ausgewählt, daß von praktisch allen in Oberösterreich eingesetzten Belüftungssystemen mit Ausnahme des Submers-Reaktors und des Systems Druckluft mit Umwälzung, wenn auch in geringerer Zahl,

Daten vorliegen. Um die Sauerstoffzufuhr unter Betriebsbedingungen mit jener in Reinwasser vergleichen zu können, wurden in jedem Fall die gleichen Versuchsbedingungen wie Beckenvolumen, Eintauch- bzw. Einblas-tiefe, Gebläse etc. eingehalten.

In Tabelle 17 wird die Sauerstoffzufuhr (OC) in Reinwasser und unter Betriebsbedingungen gegenübergestellt. Daraus ergibt sich für Oberflächenbelüfter (Rotor, Kreisel) eine Minderleistung von 13 - 15 %, für mittelblasige Belüftung von 17 - 19 %, für feinblasige Tellerbelüftung von 28 - 32 % und für die JET-Belüftung von 25 %. Überträgt man diese Minderleistung auf die durchschnittlichen Ertragswerte in Reinwasser, ergibt sich folgendes Bild:

System	Op	kg O <sub>2</sub> /kWh	Op'
Rotoren, Kreisel	1,66		1,43
Druckluft mb	1,66		1,36
Druckluft fb	3,57		2,50
JET	1,55		1,16

Diese Gegenüberstellung kann keine allgemein gültige Aussage sein, da die Anzahl der gemessenen Anlagen zu gering erscheint, vor allem für die JET-Belüftung. Es werden deshalb in nächster Zeit in verstärktem Maße Belebtschlamm-messungen an jenen Anlagen durchgeführt werden, von denen Reinwassermessungen vorliegen.

Wir wollen die Bedeutung von Sauerstoffzufuhrmessungen in Reinwasser und unter Betriebsbedingungen nicht mindern, sind jedoch der Meinung, daß es für den Kläranlagenbetreiber letztlich aber vor allem von Bedeutung ist, wie hoch der spezifische Energiebedarf bezogen auf die Reinigungsleistung (kg BSB<sub>5</sub> abgebaut) ist. Es liegen diesbe-

züglich, zwar eine Reihe von Messungen vor, die Daten reichen jedoch noch nicht aus, um eine Beziehung zu den Sauerstoffzufuhrversuchen in Reinwasser und unter Betriebsbedingungen herzustellen und entsprechende Aussagen über verschiedene Belüftungssysteme zu treffen.

OBR Dipl.Ing. Ewald Mayr  
Amt der O.ö.Landesregierung  
4020 Linz, Kärntnerstraße 12

Kläranlage		A	B	C	D	E	F1	F2	G1
Beckenvolumen	m <sup>3</sup>	1.020	2.460	861	2.095	5.700	691	691	1.054
Wassertiefe	m	3,00		2,97	3,16				
Beckenform		R	L	R	L	L	L	L	L
Bremswände		2	2		2	-	2	2	/
Leitwände		2	2		2	-	3	/	2
Belüfterfabrikat		1	1	1	1	1	3	3	2
Belüfterdurchmesser	cm	100	100	100	100	100	100	100	100
Belüfteranzahl		2	2	2	4	2	3	3	2
Länge gesamt	m	9	12	6	30	18	13,5	13,5	9,0
Eintauchtiefe	cm	30	20	28	30	33	30	30	29
Leistungsaufnahme	kW	45,6	41,1	30,2	162	94,5	74,6	54	41,4
Energiedichte	W/m <sup>3</sup>	45	16	35	80	17	108	78	39
Eintrag	kgO <sub>2</sub> /h	92	37	49,6	250	129,7	102,7	77,3	76,3
Ertrag	kgO <sub>2</sub> /kWh	2,0	1,89	1,64	1,54	1,38	1,37	1,43	1,84
Spez. Zufuhr	kgO <sub>2</sub> /m.h	10,2	6,5	8,3	8,3	7,20	7,61	5,72	8,5

Tabelle 1

Kläranlage		G2	H1	H2	H3	H4	J1	J2	J3
Beckenvolumen	m <sup>3</sup>	1.054	1.017	1.017	980	962	1.138	1.138	1.128
Wassertiefe	m		2,76	2,76	2,66	2,61	2,52	2,12	2,50
Beckenform		L	L	L	L	L	L	L	L
Bremswände		/	/	/	/	/	2	2	/
Leitwände		2	2	2	2	2	3	3	/
Belüfterfabrikat		2	2	2	2	2	3	3	3
Belüfterdurchmesser	cm	100	100	100	100	100	98	98	98
Belüfteranzahl		2	2	1	1	2	3	2	3
Länge gesamt	m	9,0	9	4,5	9	9	13,5	9	13,5
Eintauchtiefe	cm	29	30	30	20	15	32	32	30
Leistungsaufnahme	kW	45	44	22	16,5	27	66,4	45,9	76
Energiedichte	W/m <sup>3</sup>	43	43	21,5	16,8	28,1	60,1	40,3	67,4
Eintrag	kgO <sub>2</sub> /h	69,4	92	46,0	33,5	52,0	115,5	82,7	101,5
Ertrag	kgO <sub>2</sub> /kWh	1,54	2,08	2,08	2,03	1,93	1,69	1,8	1,33
Spez. Zufuhr	kgO <sub>2</sub> /m.h	7,7	10,2	10,2	7,4	5,8	8,55	9,1	7,5

Tabelle 2



Kläranlage		J4	J5	K1	K2	L1	L2	L3	M1
Beckenvolumen	m <sup>3</sup>	1.082	1.138	1.765	1.800	1.996	1.973	1.951	5.108
Wassertiefe	m	2,40	2,12	/		2,69	2,66	2,63	
Beckenform		L	L	L	L	L	L	L	L
Bremswände		/	2	/	/	/	/	/	4
Leitwände		/	3	2	2	2	2	2	8
Belüfterfabrikat		3	3	1	1	3	3	3	1
Belüfterdurchmesser	cm	98	98	100	100	93	93	93	100
Belüfteranzahl			2	2	2	2	2	2	8
Länge gesamt	m	13,5	9	15	15	15	15	15	60
Eintauchtiefe	cm	20	32	22	28	28	25	22	29,5
Leistungsaufnahme	kW	44	45,9/51,0	60	77	103,2	96	86,4	314
Energiedichte	W/m <sup>3</sup>	40,7	40,3/44,8	34	42,8	51,7	48,6	44,3	61,5
Eintrag	kgO <sub>2</sub> /h	62,1	73,9	94	109,5	161,2	143,9	124,3	504
Ertrag	kgO <sub>2</sub> /kWh	1,41	1,59/1,45	1,57	1,42	1,56	1,50	1,44	1,60
Spez. Zufuhr	kgO <sub>2</sub> /m.h	4,6	8,21	6,27	7,3	10,75	9,59	8,29	8,41

Tabelle 3

K l ä r a n l a g e		M2	N1	N2	N3	N4			
Beckenvolumen	m <sup>3</sup>	5.116	1.565	1.575	1.531	1.565			
Wassertiefe	m		2,47	2,49	2,42	2,47			
Beckenform		L	L	L	L	L			
Bremswände		/	2	2	2	/			
Leitwände		8	1	1	3	/			
Belüfterfabrikat		1	3	3	3	3			
Belüfterdurchmesser	cm	100	98	98	98	98			
Belüfteranzahl		8	3	3	3	2			
Länge gesamt	m	60	18	18	18	12			
Eintauchtiefe	cm	30	28,0	29,5	22	28,5			
Leistungsaufnahme	kW	297,6	84	90	78,7	45,3			
Energiedichte	W/m <sup>3</sup>	58,2	53,7	57,1	51,4	28,9			
Eintrag	kgO <sub>2</sub> /h	521,0	132,1	127,8	114,9	18,1			
Ertrag	kgO <sub>2</sub> /kWh	1,75	1,57	1,42	1,46	0,40			
Spez. Zufuhr	kgO <sub>2</sub> /m.h	8,68	7,34	7,1	6,39	1,51			

Tabelle 4

K l ä r a n l a g e		01	02	P1	P2	P3			
Beckenvolumen	m <sup>3</sup>	150	152	346	353	360			
Wassertiefe	m			1,95	1,99	2,03			
Beckenform		R	R	U	U	U			
Bremswände		/	/	/	/	/			
Leitwände		/	/	2	2	2			
Belüfterfabrikat		1	1	1	1	1			
Belüfterdurchmesser	cm	70	70	70	70	70			
Belüfteranzahl		1	1	2	2	2			
Länge gesamt	m	2,0	2,0	4,0	4,0	4,0			
Eintauchtiefe	cm	24	25	16	20	24			
Leistungsaufnahme	kW	5,6	5,9	9,5	12,0	13,5			
Energiedichte	W/m <sup>3</sup>	37,3	39,0	27,4	34,0	37,5			
Eintrag	kgO <sub>2</sub> /h	7,5	7,9	17,1	21,1	19,3			
Ertrag	kgO <sub>2</sub> /kWh	1,34	1,34	1,80	1,76	1,43			
Spez. Zufuhr	kgO <sub>2</sub> /m.h	3,75	3,95	4,27	5,29	4,57			

Tabelle 5

Kläranlage		R1	R2	R3	R4	S1	S2	S3	S4
Beckenvolumen	m <sup>3</sup>	1.230	1.183	1.196	1.210	1.681	1.741	1.773	1.782
Wassertiefe	m	/	/	/	/	/	/	/	/
Beckenform		2Q	2Q	2Q	2Q	RE	RE	RE	RE
Bremswände		/	2x2	2x2	2x2	/	/	/	/
Leitwände		/	/	/	/	/	/	/	/
Belüfterfabrikat		4	4	4	4	5	5	5	5
Belüfterdurchmesser	cm	/	/	/	/	/	/	/	/
Belüfteranzahl		2	2	2	2	2	2	2	2
Länge gesamt	m	/	/	/	/	/	/	/	/
Eintauchtiefe	cm	/	/	/	/	/	/	/	/
Leistungsaufnahme	kW	26,0	25,2	31,2	42,0	34,7	39,6	52,4	54,0
Energiedichte	W/m <sup>3</sup>	21,1	21,3	26,1	34,7	20,6	22,7	29,6	30,3
Eintrag	kgO <sub>2</sub> /h	39,4	41,8	48,2	71,9	54,5	67,9	83,0	79,7
Ertrag	kgO <sub>2</sub> /kWh	1,51	1,66	1,55	1,71	1,57	1,71	1,58	1,48
Spez. Zufuhr	kgO <sub>2</sub> /m.h	/	/	/	/	/	/	/	/

Tabelle 6

K l ä r a n l a g e		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
Beckenvolumen	m <sup>3</sup>	785	785	785	785	785	785	785	785	785
Wassertiefe	m	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
Beckenform		RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE
Belüfterfabrikat		1	1	1	1	1	1	1	1	1
Belüftungart		mb	mb	mb	mb	mb	mb	mb	mb	mb
Belüfteranordnung		L	L	L	L	L+U	L+U	F	F	F+U
Belüfteranzahl		120	120	120	120	120	120	120	120	120
Luftmenge	m <sup>3</sup> /h	1.380	2.760	4.140	2.760	2.760	4.140	2.760	4.140	2.760
Beaufschlagung	m <sup>3</sup> /h.B	11,5	23,0	34,5	23,0	23,0	34,5	23,0	34,5	23,0
Einblastiefe	m	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
Leistungsaufnahme	kW	21,6	43,2	69,6	43,2	43,2/57,6	64,8/79,2	42,0	64,8	42,0/56,4
Energiedichte	W/m <sup>3</sup>	27,5	55,0	88,7	55,0	55,0/73,4	82,5/100,9	53,5	82,5	53,5/71,8
Eintrag	kgO <sub>2</sub> /h	31,1	70,5	113,0	89,7	117,1	171,7	104,6	137,0	105,1
Ertrag	kgO <sub>2</sub> /kWh	1,44	1,63	1,62	2,07	2,71/2,03	2,65/2,17	2,49	2,11	2,50/1,86
Ausnutzung	gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> .m	7,0	8,0	8,5	10,2	13,2	12,9	11,8	10,3	11,9

Tabelle 7

K l ä r a n l a g e		B1	B2	C1	C2	C3	D1	D2	
Beckenvolumen	m <sup>3</sup>	850	850	796	796	796	875	875	
Wassertiefe	m	4,9	4,9	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5	
Beckenform		RE	RE	RE	RE	RE	R	R	
Belüfterfabrikat		1	1	1	1	1	1	1	
Belüftungsart		mb	mb	mb	mb	mb	mb	mb	
Belüfteranordnung		F	F	F	F	F	F	F	
Belüfteranzahl		38	38	48	48	48	110	110	
Luftmenge	m <sup>3</sup> /h	520	1.040	440	880	1.320	1.800	1.800	
Beaufschlagung	m <sup>3</sup> /h.B	13,7	27,4	9,2	18,3	27,5	16,0	16,0	
Einblastiefe	m	4,7	4,7	3,8	3,8	3,8	3,3	3,3	
Leistungsaufnahme	kW	11,2	22,4	11,7	20,6	32,4	26,5	26,6/40,0	
Energiedichte	W/m <sup>3</sup>	13,2	26,4	14,7	25,9	40,7	30,3	30,3/45,7	
Eintrag	kgO <sub>2</sub> /h	16,0	31,5	17,1	38,5	59,2	54,6	54,6	
Ertrag	kgO <sub>2</sub> /kWh	1,43	1,42	1,46	1,89	1,83	1,46	1,46/1,37	
Ausnutzung	gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> .m	6,6	6,5	10,2	11,5	11,8	6,5	/	

Tabelle 8

Kläranlage		E1	E2	E3	E4	E5	E6	F1	F2
Beckenvolumen	m <sup>3</sup>	149	291	291	149	291	291	441	441
Wassertiefe	m	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	4,2	4,2
Beckenform		Q	RE	RE	Q	RE	RE	RE	RE
Belüfterfabrikat		1	1	1	2	2	2	1	1
Belüftungstyp		mb	mb	mb	mb	mb	mb	mb	mb
Belüfteranordnung		F	F	F	F	F	F	F	F
Belüfteranzahl		30	60	60	30	60	60	34	34
Luftmenge	m <sup>3</sup> /h	300	300	450	300	300	450	440	740
Beaufschlagung	m <sup>3</sup> /h.B	10,0	5,0	7,5	10,0	5,0	7,5	12,9	21,8
Einblästiefe	m	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	4,0	4,0
Leistungsaufnahme	kW	6,7	6,7	11,0	7,0	7,0	11,5	9,0	12,4
Energiedichte	W/m <sup>3</sup>	44,7	22,0	37,8	47,0	24,1	39,5	20,4	28,1
Eintrag	kgO <sub>2</sub> /h	9,1	10,4	17,3	9,9	11,1	15,4	10,8	22,0
Ertrag	kgO <sub>2</sub> /kWh	1,37	1,55	1,57	1,42	1,58	1,34	1,20	1,80
Ausnutzung	gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> .m	8,6	9,7	10,8	9,6	10,7	9,9	6,2	7,5

Tabelle 9






					
m <sup>3</sup> /h.B	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
kg O <sub>2</sub> /h	70,5	89,7	117,1	104,6	105,1
kW	43,2	43,2	57,6	42,0	56,4
kg O <sub>2</sub> /kWh	1,63	2,07	2,03	2,49	1,86
g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ·m <sub>ET</sub>	8,0	10,2	13,2	11,8	11,9
m <sup>3</sup> /h.B	34,5	-	34,5	34,5	-
kg O <sub>2</sub> /h	113,0	-	171,7	137,0	-
kW	69,6	-	79,2	64,8	-
kg O <sub>2</sub> /kWh	1,62	-	2,17	2,11	-
g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ·m <sub>ET</sub>	8,5	-	12,9	10,3	-

Tabelle 10

System	Anlage	OC <sub>10</sub>	OC <sub>10</sub> '	%
Rotor	1	119,3	101,0	- 15
	2	92,0	79,1	- 14
Kreisel	3	39,0	33,9	- 13
Druckluft mb	4	133,2	109,9	- 17
	5	38,1	30,8	- 19
Druckluft fb	6	212,2	153,2	- 28
	6	87,7	59,2	- 32
	7	181,5	128,3	- 29
JET	8	87,4	65,1	- 25

Tabelle 17



Kläranlage		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
Beckenvolumen	m <sup>3</sup>	149	291	291	291	291	149	291	291
Wassertiefe	m	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
Beckenform		Q	RE	RE	RE	RE	Q	RE	RE
Belüfterfabrikat		1	1	1	2	2	2	4	4
Belüftungsart		F	F	F	F	F	F	F	F
Belüfteranordnung		mb	mb	mb	mb	mb	mb	fb	fb
Belüfteranzahl		30	60	60	60	60	30	60	60
Luftmenge	m <sup>3</sup> /h	300	300	450	300	450	300	300	450
Beaufschlagung	m <sup>3</sup> /h.B	10,0	5,0	7,5	5,0	7,5	10,0	5,0	7,5
Einblastiefe	m	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45
Leistungsaufnahme	kW	6,7	6,7	11,0	7,0	11,5	7,0	7,9	13,2
Energiedichte	W/m <sup>3</sup>	44,7	22,8	37,8	24,1	39,5	47,0	27,1	45,3
Eintrag	kgO <sub>2</sub> /h	9,1	10,4	17,3	11,1	15,4	9,9	15,3	23,7
Ertrag	kgO <sub>2</sub> /kWh	1,37	1,55	1,57	1,58	1,34	1,42	1,93	1,79
Ausnutzung	gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> .m	8,6	9,7	10,8	10,7	9,9	9,6	14,8	15,3

Tabelle 11

Kläranlage		G1	G2	G3	H1	H2	H3	I1	I2
Beckenvolumen	m <sup>3</sup>	2.664	2,664	2.664	808	808	808	1.927	1.927
Wassertiefe	m	3,96	3,96	3,96	4,0	4,0	4,0	4,4	4,4
Beckenform		U	U	U	U	U	U	U	U
Belüfterfabrikat		1	1	1	1	1	1	1	1
Belüftungsart		mb	mb	mb	mb	mb	mb	mb	mb
Belüfteranordnung		F	F	F	F	F	F	F	F
Belüfteranzahl		140	140	140	27	27	27	54	54
Luftmenge	m <sup>3</sup> /h	2.600	3.300	3.800	550	660	800	1.450	1.450
Beaufschlagung	m <sup>3</sup> /h.B	18,6	23,6	27,1	20,4	24,4	29,6	26,8	26,8
Einblastiefe	m	3,76	3,76	3,76	3,75	3,75	3,75	4,20	4,20
Leistungsaufnahme	kW	60,8/63,9	68,9/77,4	75,8/78,9	12,5/15,0	13,0/15,9	13,6/16,5	27,8/33,3	27,3/40,0
Energiedichte	W/m <sup>3</sup>	22,8/24,0	25,8/29,0	28,5/29,6	15,5/18,6	16,1/19,7	16,8/20,4	14,4/17,3	14,2/20,7
Eintrag	kgO <sub>2</sub> /h	126,3	150,9	163,0	20,9	23,0	25,1	58,7	58,0
Ertrag	kgO <sub>2</sub> /kWh	2,08/1,98	2,19/1,95	2,15/2,07	1,67/1,39	1,77/1,45	1,85/1,52	2,11/1,76	2,12/1,45
Ausnutzung	gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> .m	12,9	12,2	11,4	10,1	9,3	8,4	9,6	9,5

Tabelle 12

Kläranlage		K1	K2	L1	L2	L3	M		
Beckenvolumen	m <sup>3</sup>	750	750	1.533	1.533	1.533	994		
Wassertiefe	m	3,92	3,92	4,46	4,46	4,46	4,25		
Beckenform		U	U	U	U	U	U		
Belüfterfabrikat		1	1	1	1	1	1		
Belüftungart		mb	mb	mb	mb	mb	mb		
Belüfteranordnung		F	F	F	F	F	F		
Belüfteranzahl		88	88	100	100	100	84		
Luftmenge	m <sup>3</sup> /h	1.800	2.020	1.130	1.130	2.260	1.500		
Beaufschlagung	m <sup>3</sup> /h.B	20,5	23,0	11,3	11,3	22,6	17,8		
Einblastiefe	m	3,70	3,70	4,24	4,24	4,24	4,00		
Leistungsaufnahme	kW	29,3/32,2	35,5/38,4	21,6/23,7	30,2/34,4	55,5/59,7	22,1/24,0		
Energiedichte	W/m <sup>3</sup>	/42,9	/51,2	14,1/15,5	19,7/22,4	36,2/38,9	22,2/24,1		
Eintrag	kgO <sub>2</sub> /h	59,9	59,7	39,0	41,8	71,1	44,3		
Ertrag	kgO <sub>2</sub> /kWh	2,04/1,86	1,68/1,55	1,81/1,65	1,38/1,22	1,28/1,19	2,00/1,85		
Ausnutzung	gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> .m	8,9	8,0	8,1	8,7	7,4	7,4		

Tabelle 13

Kläranlage		N1	N2	N3	O1	O2	O3	P1	P2
Beckenvolumen	m <sup>3</sup>	480	480	480	1.644	1.644	1.644	7.680	7.680
Wassertiefe	m	4,20	4,20	4,20	4,36	4,36	4,36	4,79	4,79
Beckenform		RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE
Belüfterfabrikat		5	5	5	5	5	5	5	5
Belüftungstyp		fb	fb	fb	fb	fb	fb	fb	fb
Belüfteranordnung		F	F	F	F	F	F	L	L
Belüfteranzahl		64	64	64	460	460	460	1.536	1.536
Luftmenge	m <sup>3</sup> /h	993	496	667	3.900	5.260	5.960	8.960	11.090
Beaufschlagung	m <sup>3</sup> /h.B	15,5	7,8	10,4	8,5	11,4	13,0	5,8	7,2
Einblastiefe	m	3,97	3,97	3,97	4,1	4,1	4,1	4,3	4,3
Leistungsaufnahme	kW	21,0	10,3	16,0	75	93	109	141	179
Energiedichte	W/m <sup>3</sup>	43,8	21,5	24,0	45,6	56	66	18,4	23,3
Eintrag	kgO <sub>2</sub> /h	56,4	31,2	48,3	239,6	298,9	209,3	412	506
Ertrag	kgO <sub>2</sub> /kWh	2,69	3,03	3,02	3,19	3,21	3,15	2,92	2,83
Ausnutzung	gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> .m	14,3	15,8	18,2	15,0	13,9	14,1	10,7	10,6

Tabelle 14

Kläranlage		R1	R2	S	T1	T2	U1	U2	V1
Beckenvolumen	m <sup>3</sup>	604	604	395	1.970	1.970	1.800	1.800	722
Wassertiefe	m	3,62	3,62	4,40	4,68	4,68	5,0	5,0	4,5
Beckenform		RE	RE	RE	RE	RE	LU	LU	RE
Belüfterfabrikat		3	3	3	3	3	3	3	3
Belüftungsgart		fb	fb	fb	fb	fb	fb	fb	fb
Belüfteranordnung		F	F	F	F	F	F	F	F
Belüfteranzahl		420	420	132	560	560	287	287	168
Luftmenge	m <sup>3</sup> /h	714	2.140	840	1.920	3.080	800	1.500	380
Beaufschlagung	m <sup>3</sup> /h.B	1,7	5,1	6,4	3,4	5,5	2,8	5,2	2,3
Einblastiefe	m	3,4	3,4	4,15	4,43	4,43	4,72	4,72	4,25
Leistungsaufnahme	kW	13,4	39,5	16,0	39,6	56,4	21,4/27,6	34,0/40,2	13,2
Energiedichte	W/m <sup>3</sup>	22,2	65,4	40,5	20,1	28,6	11,9/15,3	18,9/22,3	18,3
Eintrag	kgO <sub>2</sub> /h	54,6	132,1	60,5	129,9	182,1	69,3	111,1	32,0
Ertrag	kgO <sub>2</sub> /kWh	4,07	3,34	3,78	3,26	3,23	3,24/2,51	3,27/2,76	2,42
Ausnutzung	gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> .m	22,5	18,1	17,3	15,3	13,3	18,3	15,7	19,8

- 130 -

Tabelle 15

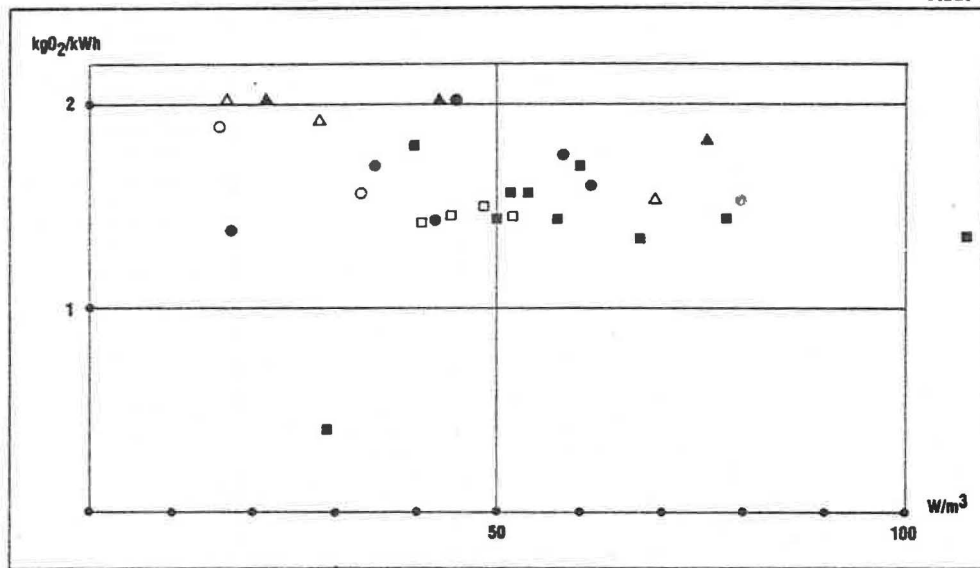
Kläranlage		X1	X2	Y1	Y2	Y3	Z1	Z2	Z3	Z4
Beckenvolumen	m <sup>3</sup>	2.850	2,850	1.980	1.980	1.980	435	435	580	580
Wassertiefe	m	4,0	4,0	10,5	10,5	10,5	8,4	8,4	8,5	8,5
Beckenform		RE	RE	T	T	T	T	T	T	T
Belüfterfabrikat		6	6	7	7	7	7	7	7	7
Belüftungsart		JET	JET	-----Submers Reaktor-----						
Belüfteranordnung		F	F							
Belüfteranzahl		72	72	2	4	4	3	3	4	4
Luftmenge	m <sup>3</sup> /h	5.380	7.300		520		180	511	546	628
Beaufschlagung	m <sup>3</sup> /h.B	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Einblattiefe	m	3,3	3,3	10,35	10,35	10,35	8,3	8,3	8,3	8,3
Leistungsaufnahme	kW	132,3	152,3	18,2	34,6	36,3	8,3	25,0	31,6	32,2
Energiedichte	W/m <sup>3</sup>	46,4	53,4	9,2	17,5	18,3	19,1	57,5	54,5	55,5
Eintrag	kgO <sub>2</sub> /h	194,6	249,2	30,4	61,9	62,4	15,1	50,6	64,5	68,5
Ertrag	kgO <sub>2</sub> /kWh	1,47	1,64	1,67	1,79	1,72	1,82	2,02	2,04	2,12
Ausnutzung	gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> .m	10,9	10,3		11,5		10,1	11,9	14,2	13,1

Tabelle 16

### ROTOREN

● Fabr. 1    ○  
 ET 26-33 cm    ▲ Fabr. 2    △ ET 15-25 cm  
 ■ Fabr. 3    □

Abb. 1



### ROTOREN

○ p.M. Motor    + in Kurve    × Rotoren + Propeller

Abb. 2

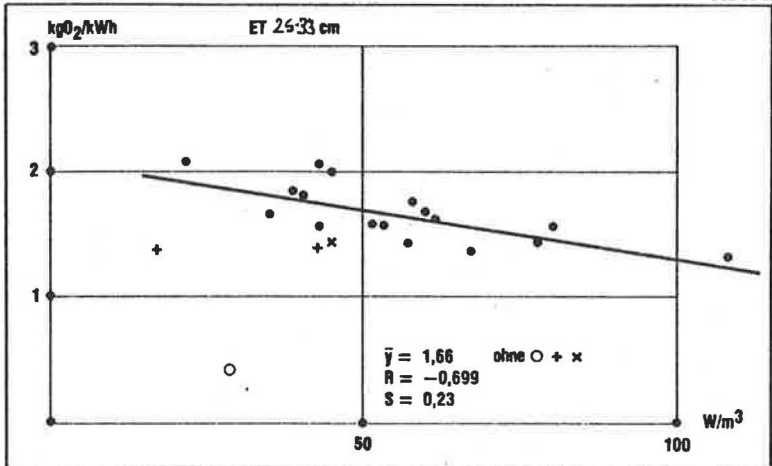
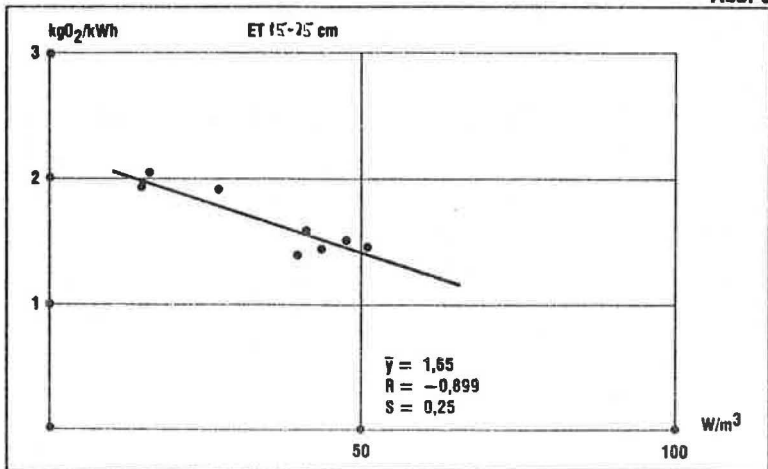


Abb. 3





### DRUCKLUFT mittelblasig ohne Umwzung

• Fche + Linie • + Schaumstoff x Schlauch

Abb. 4

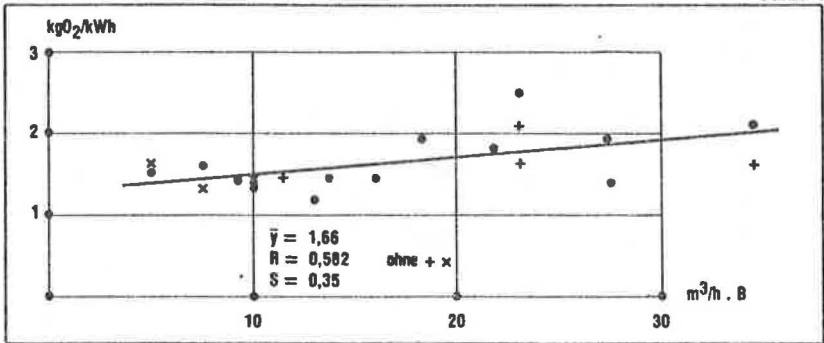
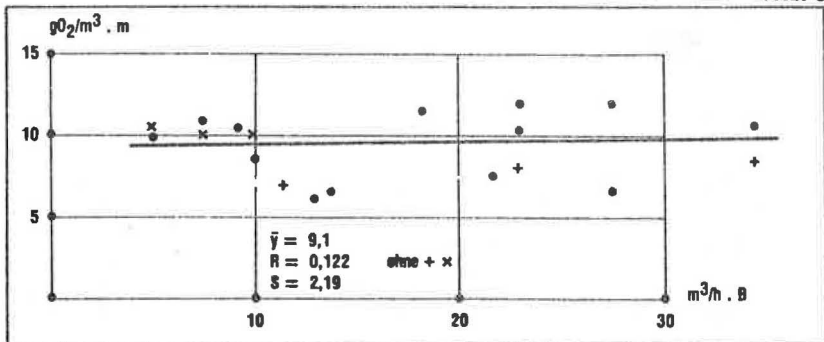


Abb. 5



**DRUCKLUFT mittelblasig mit Umwälzung**

○ × Fläche + Linie

Abb. 6

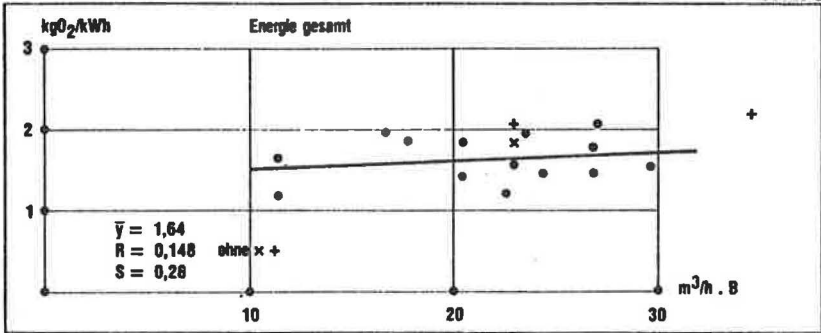


Abb. 7

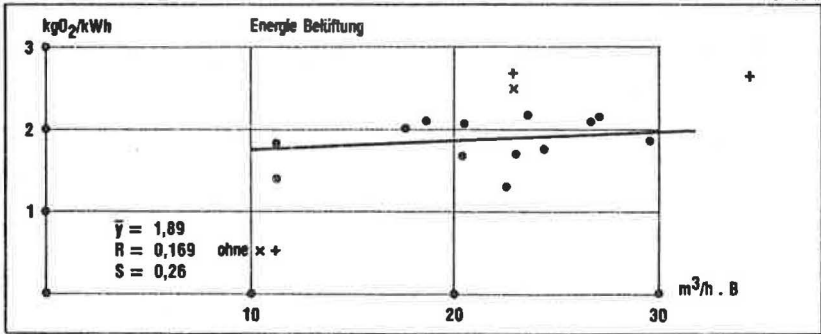
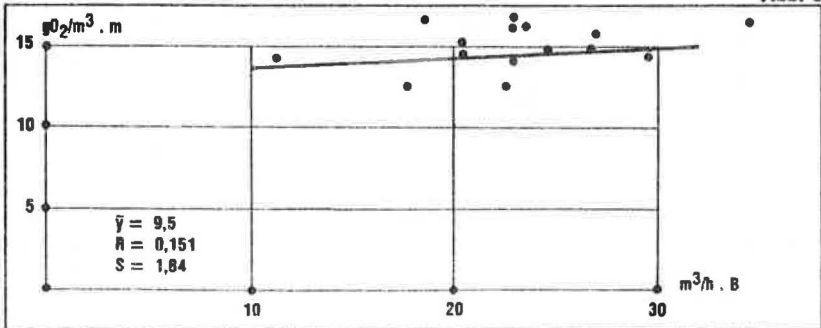


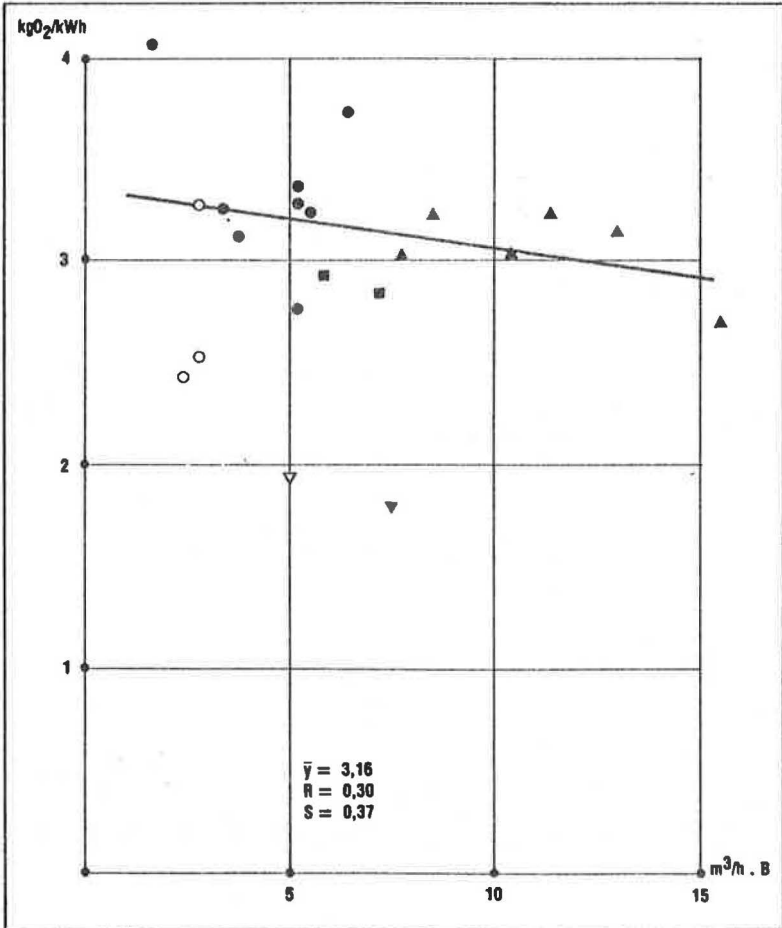
Abb. 8



### DRUCKLUFT feinblasig

●○ Teller    ▲△ Kerzen Fläche    ▼▼ GM-Teller  
■ Kerzen Linie

Abb. 9



### DRUCKLUFT feinblasig Kerzen

• Fläche + Linie

Abb. 10

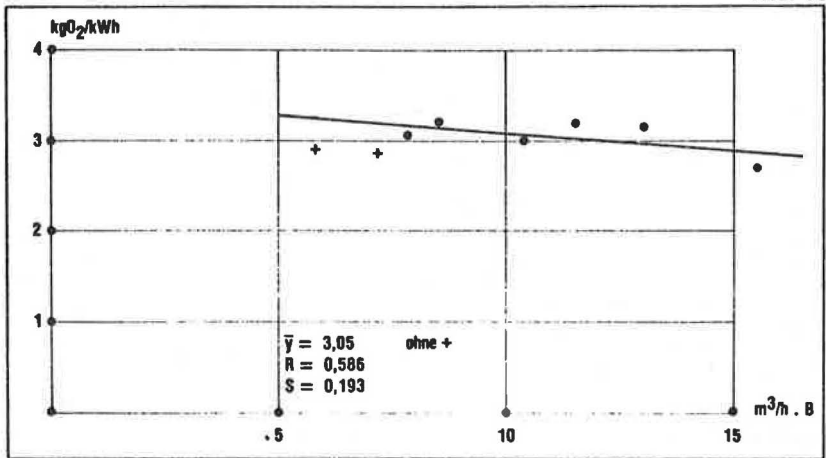
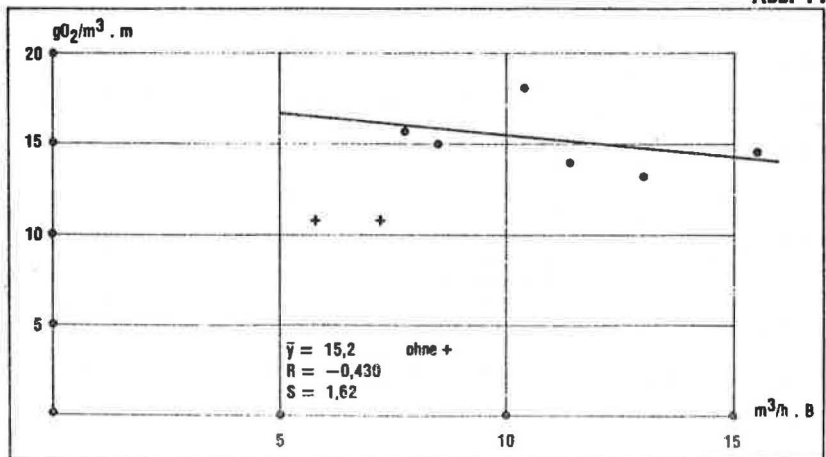


Abb. 11



### DRUCKLUFT feinblasig Teller

• ○ × Fläche ○ ● p.u. Motor × GM-Teller

Abb. 12

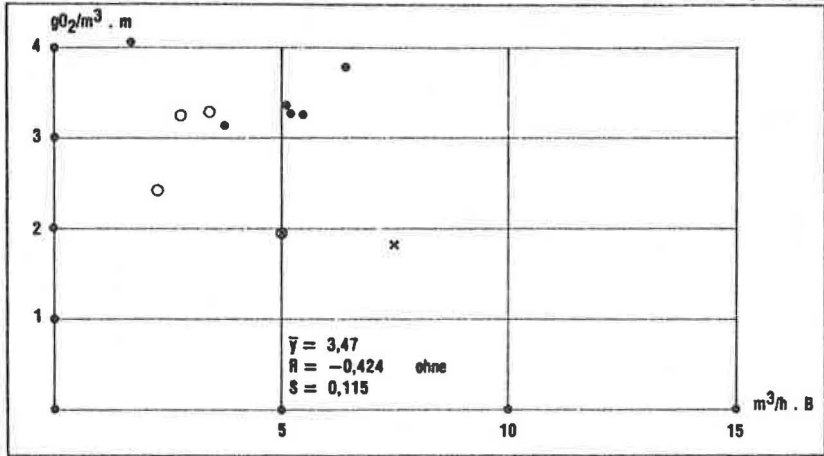
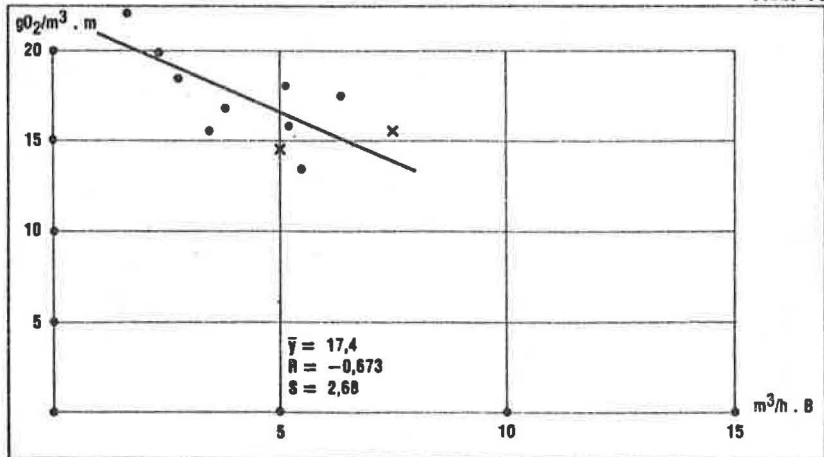
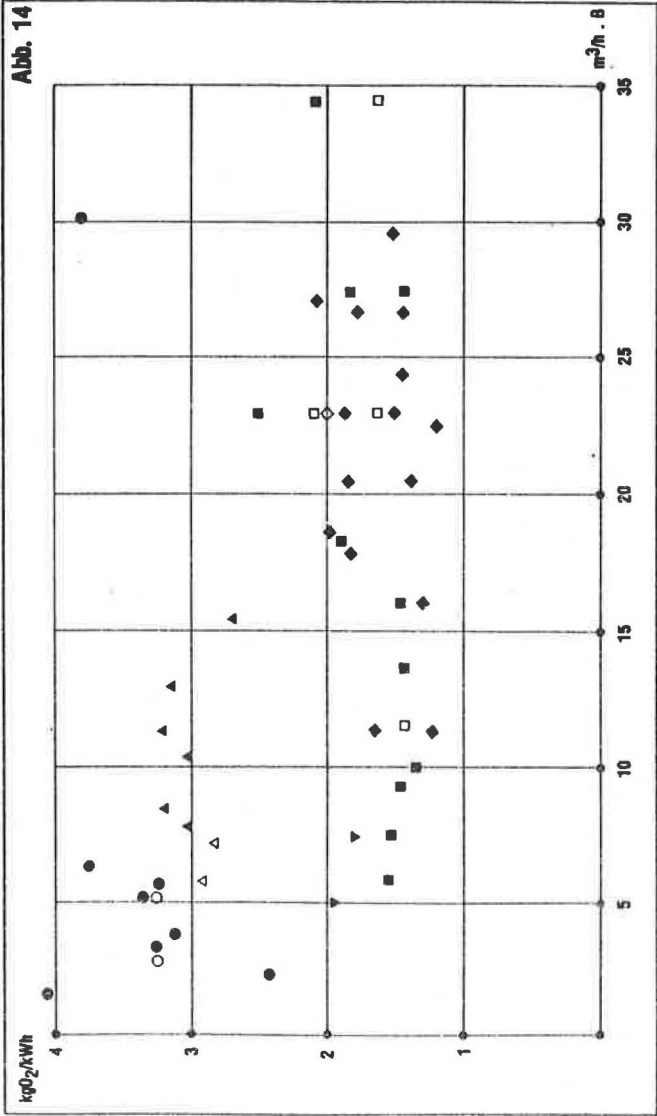


Abb. 13



**DRUCKLUFT**

- Teiler Fläche
- Teiler Fläche mit Umwälzung
- ▲ Kerzen Fläche
- ▼ GIM-Teiler Fläche
- ◆ Schaumstoff Fläche mit Umwälzung
- Schaumstoff Fläche
- ◇ Schaumstoff Fläche
- △ Kerzen Linie
- ◇ Schaumstoff Linie
- ◇ Schaumstoff Linie mit Umwälzung





ERGEBNISSE VON SAUERSTOFFZUFUHRVERSUCHEN  
MIT VERSCHIEDENEN BELÜFTUNGSSYSTEMEN

Frey W.

1. EINLEITUNG

In den vergangenen 15 Jahren wurden seitens des Institutes für Wassergüte und Landschaftswasserbau eine Reihe von Sauerstoffzufuhrversuchen durchgeführt. Ein Teil der Messungen diente zu Forschungszwecken, andere zur Feststellung der Belüfterleistung (Abnahmeversuche). Daher konnten bei den im folgenden angeführten Versuchen, auf Grund der örtlichen Verhältnisse oft nicht alle für die Forschung interessierenden Versuchsparameter erfaßt werden.

Außerdem wurde im Rahmen eines Gutachtens eine Reihe von Anlagen im Hinblick auf den erreichten  $\alpha$ -Wert untersucht, wobei verschiedene Methoden zur Bestimmung der Sauerstoffzufuhr unter Betriebsbedingungen angewendet wurden.

2. VERSUCHSTECHNIK

Die von den Lieferfirmen angegebenen Garantiewerte beziehen sich in der Regel auf Sauerstoffzufuhr in Reinwasser. Die von unserem Institut durchgeführten Abnahmeversuche wurden daher ebenfalls in Reinwasser nach ÖNORM M 5888 durchgeführt und ausgewertet. Zur Bestimmung des Belüftungskoeffizienten wird von uns ein Rechnerprogramm verwendet.

Die Leistung verschiedener Belüftersysteme kann in Reinwasser wesentlich unterschiedlich von jener in Abwasser sein. Für die Wirtschaftlichkeit eines Belüftungssystems ist die Belüfterkapazität unter Betriebsbedingungen ausschlaggebend. Die Bestimmung der Sauerstoffzufuhr unter Betriebsbedingungen kann nach KAYSER 1977, 1982 prinzipiell mit steigendem



oder abnehmendem Sauerstoffgehalt durchgeführt werden. Die Auswertung der Versuche erfolgt nach, zu den Reinwasserversuchen analogen Gesetzmäßigkeiten.

Eine Abschätzung der Sauerstoffzufuhr unter Betriebsbedingungen kann unter stationären Verhältnissen mit folgender Gleichung erfolgen:

$$\alpha \cdot OC = \frac{c_s}{c_s - c_x} \cdot OV \quad (\text{Gl. 1})$$

- $\alpha \cdot OC$  [g O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.h] ... Sauerstoffzufuhr unter Betriebsbedingungen  
 $c_s$  [g O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>] ... Sättigungswert  
 $c_x$  [g O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>] ... Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken  
OV [g O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.h] ... Sauerstoffverbrauch (gemessen im Atmungsgefäß)

Ist für das selbe Belüftungssystem die Sauerstoffzufuhr in Reinwasser bekannt, so kann man den  $\alpha$ -Wert nach

$$\alpha = \frac{\text{Sauerstoffzufuhr unter Betriebsbedingungen}}{\text{Sauerstoffzufuhr in Reinwasser}}$$

berechnen.

Eine weitere Möglichkeit zur Messung der Sauerstoffzufuhr ist bei Druckbelüftung durch Messung des Sauerstoffgehaltes in der aus dem Belebungsbecken austretenden Luft gegeben. Die Bestimmung erfolgt nach

$$OC'_{L-ET} = \frac{G}{ET} \cdot \frac{(100 - c_L)}{100} \cdot \frac{c_s}{c_s - c_x} \quad (\text{Gl. 2})$$

- $OC'_{L-ET}$  [g/Nm<sup>3</sup>.m] ... Spez. Sauerstoffzufuhr unter Betriebsbedingungen bei Versuchstemperatur bezogen auf 0 g O<sub>2</sub>/l im Belebungsbecken  
G [g/Nm<sup>3</sup>] ... Gramm Sauerstoff pro Nm<sup>3</sup> Luft (= 300 g/Nm<sup>3</sup>)  
ET [m] ... Einblastiefe

- $c_L$  [%] ... Sauerstoffgehalt der austretenden Luft (100 %  $\hat{=}$  Luft mit 21 Vol% Sauerstoff)
- $c_s$  [g/m<sup>3</sup>] ... Sättigungswert für Sauerstoff in destilliertem Wasser bei 1013 mbar und Versuchstemperatur (Korr. mit Einblas tiefe)
- $c_x$  [g/m<sup>3</sup>] ... Sauerstoffgehalt im Belebungsbecken

### 3. VERSUCHSERGEBNISSE

Die in den folgenden Tabellen angegebenen Werte sind zum Großteil Mittelwerte aus zwei und mehr Versuchen. In den Tabellen sind der Erzeuger des Belüftungssystems, die Anordnung der Belüfter, die Gebläseart mit Erzeuger, die Beckenabmessungen, das Nutzvolumen, die Einblastiefe bzw. die Eintauchtiefe, der Rotorabstand, die Umfangsgeschwindigkeit und die Methoden zur Leistungs- und Luftmengenmessung sowie die für die jeweilige Versuchseinstellung ermittelten Werte angeführt. Die je nach Belüftungssystem ermittelten Werte sind:

- $OC_{10}$  [g/m<sup>3</sup>.h] ... Sauerstoffzufuhr bezogen auf 10° C und 1013 mbar
- $O_p$  [kg O<sub>2</sub>/kWh] ... Sauerstoffertrag
- $OC_{L-ET}$  [g/Nm<sup>3</sup>.m] ... Spez. Sauerstoffzufuhr bezogen auf Nm<sup>3</sup> eingeblasene Luft und m Einblastiefe
- $P_{L-ET}$  [Wh/Nm<sup>3</sup>.m] ... Einblasenergie pro Nm<sup>3</sup> Luft und m Einblastiefe
- $P_{L-ET}^*$  [Wh/Nm<sup>3</sup>.m] ... wie  $P_{L-ET}$ , hier Energie für die Umwälzung (Rührer, Pumpen)
- $P_{BB}$  [W/m<sup>3</sup>] ... Leistung pro m<sup>3</sup> Becken
- $Q_{L-BB}$  [Nm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.h] ... Spez. Luftmenge bezogen auf m<sup>3</sup> Becken und Stunde
- $Q_{L-B}$  [Nm<sup>3</sup>/Bel.h] ... Spez. Luftmenge pro Belüfter (m Filterrohr, Dom, m<sup>2</sup> Platte) und Stunde
- $OC/m_R$  [kg/m<sub>R</sub>.h] ... Spez. Sauerstoffzufuhr pro m Rotor und Stunde
- $P/m_R$  [kW/m<sub>R</sub>] ... Spez. Leistung pro m Rotor

$V/m_R$	$[m^3/m_R]$	... $m^3$ Becken pro m Rotor
$v_u$	$[m/s]$	... Umfangsgeschwindigkeit
OC/Bel	$[kg/Bel.h]$	... Spez. Sauerstoffzufuhr pro Kreisel und Stunde

Wenn nicht anders angegeben handelt es sich um Reinwasser-  
versuche.

### 3.1 Anlagen mit feinblasiger Belüftung

Die Belüftung der Anlagen 1 und 2 erfolgt mit Filterdome-  
n der Firma Hawker-Sidley. Die Filterdome sind in Form einer  
Flächenbelüftung installiert. In beiden Fällen kommen Dreh-  
kolbengebläse der Firma Aerzen zum Einsatz.

Auf Anlage 3 sind Belüfterdome der Firma von Roll mit einem  
Turboverdichter der Firma Helsingör im Einsatz.

Auf der Anlage 4 arbeiten Rohrbelüfter der Firma Nokia und  
auf Anlage 5 Filterrohre der Firma Schuhmacher (Brandol).

Anlage 6 ist mit Messner-Platten ausgerüstet, wobei die  
Bodenfläche zu 30 % mit Belüfterplatten ausgelegt war. Die  
spez. Sauerstoffzufuhr, die bei diesem Belüftungssystem ge-  
messen wurde, liegt deutlich über den für feinblasige Be-  
lüftung üblichen Werten. Mit den Plattenbelüftern liegen  
uns keine Werte unter Betriebsbedingungen vor, es ist abzu-  
warten, welche  $\alpha$ -Werte mit diesem System erreicht werden.

Leider konnte nicht bei allen Anlagen die Luftmenge gemes-  
sen werden. Die Luftmenge wurde daher auf Grund von Firmen-  
angaben (z.B. Diagramme) angenommen. Dadurch sind die spe-  
zifischen Sauerstoffzufuhrwerte ( $OC_{L-ET}$ ), aber auch die  
spezifische Einblasenergie ( $P_{L-ET}$ ) unsicher. Mit Ausnahme  
der Anlage 3 wurde überall die elektrische Leistung gemes-  
sen, sodaß die Sauerstofffertragswerte gesichert sein dürf-  
ten.

TABELLE 1 : SAUERSTOFFZUFUHRVERSUCHE MIT FEINBLASIGER BELÜFTUNG

Anl.	Bel.Sy.	Anor.	Gebl.	L/B/T	Vol.	ET	OC <sub>10</sub>	O <sub>p</sub>	OC <sub>L-ET</sub>	P <sub>L-ET</sub>	P <sub>BB</sub>	Q <sub>L-BB</sub>	Q <sub>L-B</sub>	Luftm.	Leistm.
				m	m <sup>3</sup>	m	$\frac{g}{m^3 \cdot h}$	$\frac{kg}{kWh}$	$\frac{g}{Nm^3 \cdot m}$	$\frac{Wh}{Nm^3 \cdot m}$	$\frac{W}{m^3}$	$\frac{Nm^3}{m^3 \cdot h}$	$\frac{Nm^3}{Bel \cdot h}$		
1	Dom Haw.	flä.	Aerzen	20,0/4,5/3,8	340	3,6	99,0	2,45	14,6	6,0	40	1,9	12	Fir.ang.	kWh-Z.
2 2	Dom Hawker	flä.	Aerzen	27,0/8,0/4,1*	1736 1736	3,8 3,8	58,9 40,4	2,58 2,93	11,8 13,4	4,6 4,6	23 14	1,3 0,8	3 2	Fir.ang. Fir.ang.	kWh-Z. kWh-Z.
3 3 3	Dom von Roll	flä.	Turbo Verd. Helsingör	52,8/8,0/4,2	1760 1760 1760	3,9 3,9 3,9	103,9 83,9 80,7	3,11 3,08 3,25	13,0 12,7 13,5	4,2 4,1 4,1	33 27 25	2,0 1,7 1,5	4 3 3	Fir.ang. Fir.ang. Fir.ang.	Fir.ang. Fir.ang. Fir.ang.
4 4 4	Rohr Nokia	lin.	Aerzen	34,5/12,9/5,6	2394 2394 2394	5,1 5,1 5,1	82,0 54,0 42,0	2,25 2,28 2,39	11,0 12,0 14,2	4,9 5,2 5,9	37 24 18	1,5 0,9 0,6	20 12 8	Fir.ang. Fir.ang. Fir.ang.	kWh-Z. kWh-Z. kWh-Z.
5 5	Rohr Brandol	lin.	Aerzen	30,0/3,8/3,8*	822 822	3,5 3,5	79,3 49,6	2,87 2,68	13,9 13,1	5,0 5,0	28 19	1,6 1,0	23 15	Fir.ang. Fir.ang.	MeBz. MeBz.
6 6	Platten Messner	flä.	Aerzen	Da=17,4 Di=11,3	392 392	2,9 2,9	34,7 21,3	2,83 3,49	24,2 29,7	8,5 8,5	12 6	0,5 0,2	5 2	Fir.ang. Fir.ang.	kWh-Z. kWh-Z.

\* Doppelbecken

### 3.2 Anlagen mit Schaumstoffbelüftern

Alle von uns untersuchten Anlagen waren mit Schaumstoffbelüftern der Firma Flygt ausgerüstet. Für die Drucklufzeugung waren Drehkolbengebläse der Firmen Ochsner-Robuschi, WKE und Hick installiert. In Anlage 11 wurde die Sauerstoffzufuhr unter Betriebsbedingungen durch Messen des Sauerstoffverbrauches und des Sauerstoffgehaltes im Belebungsbecken entsprechend Gleichung (1) berechnet sowie durch Zugabe von Peroxid nach KAYSER (1982) bestimmt. Nach Gleichung 1 wurde ein Sauerstoffertrag von 1,48 kg O<sub>2</sub>/kWh und durch Zugabe von Peroxid von 1,36 kg O<sub>2</sub>/kWh ermittelt. Bezogen auf den Sauerstoffertrag in Reinwasser von 2,04 kg O<sub>2</sub>/kWh errechnet sich ein mittlerer  $\alpha$ -Wert von 0,66.

Anlage 13 war eine Versuchsanlage, die Luft wurde aus der Hauptluftleitung der Großanlage entnommen. Eine Bestimmung der entsprechenden Leistung war nicht möglich. Auf dieser Anlage wurden zwei Versuche mit Zugabe von 5 mg/l Detergentien (Waschmittel) durchgeführt. Hierbei wurde eine Verminderung der Sauerstoffzufuhr auf 55 % festgestellt.

### 3.3 Anlagen mit kombinierter Belüftung

Bei Anlage 14 wird feinblasige Belüftung mit Rührwerken zur getrennten Umwälzung eingesetzt. Bei den Reinwasserversuchen wurde die Leistung über kWh-Zähler gemessen. Es wurden auch Versuche unter Betriebsbedingungen ohne Abwasser- und Rücklaufschlammzufluß durchgeführt. Für diese Versuche wurde eine Meßblende für die Luftmessung eingebaut, die Energiemessung erfolgte nur über V-, A-Meter sowie  $\cos\phi$ -Meßgerät. Die Leistung der Rührwerke konnte nicht gemessen werden, die angegebenen Werte basieren auf Firmenangaben. Der  $\alpha$ -Wert ergab sich zu 0,76.

Auf Anlage 15 kommen Messner-Plattenbelüfter kombiniert mit einem Rührwerk zum Einsatz, etwa 50 % der Bodenfläche sind

TABELLE 2 : SAUERSTOFFZUFUHRVERSUCHE MIT SCHAUMSTOFFBELÜFTERN

Anl.	Bel.Sy.	Anor.	Gebf.	L/B/T	Vol.	ET	OC <sub>10</sub>	O <sub>p</sub>	OC <sub>L-ET</sub>	P <sub>L-ET</sub>	P <sub>BB</sub>	Q <sub>L-BB</sub>	Q <sub>L-B</sub>	Luftm.	Leistm.	
				m	m <sup>3</sup>	m	$\frac{g}{m^3 \cdot h}$	$\frac{kg}{kWh}$	$\frac{g}{Nm^3 \cdot m}$	$\frac{Wh}{Nm^3 \cdot m}$	$\frac{W}{m^3}$	$\frac{Nm^3}{m^3 \cdot h}$	$\frac{Nm^3}{Bel \cdot h}$			
7	Flygt	lin.	Ochsner	30,0/4,0/4,2	498	3,9	154,6	1,68	9,3	5,5	91	4,3	31	Fir.ang.	Fir.ang.	
8	Flygt	lin.	WKE-KSB	34,0/10,0/4,0	1311	3,5	154,9	1,95	7,8	4,0	79	5,7	28	Fir.ang.	Fir.ang.	
9	Flygt	lin.	Fa.Hick	26,1/9,0/3,5	785	3,3	137,0	1,55	8,2	5,3	89	5,1	33	Blende	kWh-Z.	
9					785	3,3	83,9	1,44	7,6	5,3	58	3,4	22	Blende	kWh-Z.	
9					785	3,3	37,8	1,36	7,2	5,3	28	1,6	10	Blende	kWh-Z.	
10	Flygt	flä.	Ochsner	17,1/7,0/4,5	540	4,3	93,1	1,72	7,1	4,1	54	3,1	25	Fir.ang.	kWh-Z.	
10					540	4,3	94,8	1,76	7,2	4,1	54	3,1	25	Fir.ang.	kWh-Z.	
11	Flygt	flä.	Ochsner	26,6/8,1/4,3	919	4,1	79,3	2,04	9,1	4,1	39	2,4	17	Fir.ang.	kWh-Z.	
12	Flygt	lin.	Ochsner	20,0/4,7/2,7	252	2,5	163,8	1,41	6,6	4,7	116	9,9	42	Fir.ang.	Fir.ang.	
13	Flygt	lin.	-	12,0/3,7/3,0	137	2,8	159,6	-	10,6	-	-	5,3	31	Blende	-	
13					137	2,8	148,6	-	10,1	-	-	5,2	30	Blende	-	
13					137	2,8	90,8	-	9,1	-	-	3,5	20	Blende	-	
13					137	2,8	44,1	-	8,8	-	-	1,8	10	Blende	-	
13					*	137	2,8	79,8	-	5,5	-	-	5,2	29	Blende	-
13					*	137	2,8	48,3	-	5,0	-	-	3,5	20	Blende	-

\*Versuch mit Detergentien

TABELLE 3 : SAUERSTOFFZUFUHRVERSUCHE MIT KOMBINIERTER BELÜFTUNG

Anl.	Bel.Sy.	Gebli.	L/B/T	Vol.	ET	OC <sub>10</sub>	O <sub>p</sub>	OC <sub>L-ET</sub>	P <sub>L-ET</sub>	P <sup>*</sup> <sub>L-ET</sub>	P <sub>BB</sub>	Q <sub>L-BB</sub>	Q <sub>L-B</sub>	Luftm.	Leistm.
						$\frac{g}{m^2 \cdot h}$	$\frac{kg}{kWh}$	$\frac{g}{Nm^2 \cdot m}$	$\frac{Wh}{Nm^2 \cdot m}$	$\frac{Wh}{Nm^2 \cdot m}$	$\frac{W}{m^3}$	$\frac{Nm^3}{m^2 \cdot h}$	$\frac{Nm^3}{Bel \cdot h}$		
14	Dom	Aerzen	41,0/11,5/6,3	2800	6,1	48,2	1,75	8,3	4,4	0,5	28	0,9	8	Fir.ang.	kWh-Z.
14	Menzel			2800	6,1	50,0	2,12	10,4	4,4	0,6	24	0,8	7	Fir.ang.	kWh-Z.
14	Zeilpox			2800	6,1	35,1	1,58	7,1	3,9	0,6	22	0,8	7	Fir.ang.	kWh-Z.
14				2800	6,1	26,7	1,66	8,4	4,2	0,9	16	0,5	5	Fir.ang.	kWh-Z.
14				2800	6,1	18,7	1,87	11,6	4,6	1,8	10	0,3	2	Fir.ang.	kWh-Z.
14	**			2800	6,1	40,8	1,24	7,2	5,3	0,5	33	0,9	8	Blende	V-,A-Met.
14	**			2800	6,1	39,6	1,21	7,0	5,3	0,5	33	0,9	8	Blende	V-,A-Met.
14	**			2800	6,1	28,4	1,21	6,5	4,7	0,7	23	0,7	6	Blende	V-,A-Met.
15	Platten	Aerzen	Ø=18,0/6,1	1550	6,1	75,8	3,67	18,2	4,7	0,3	21	0,7	8	Fir.ang.	Meßz.
15	Messner			1550	6,1	53,4	3,76	21,5	5,2	0,5	14	0,4	5	Fir.ang.	Meßz.
16	Ejektor	Drehk. Penberthy	35,0/20,3/4,0	2860	3,1	67,9	1,48	11,1	7,5	-	45	2,0	93	Fir.ang.	Fir.ang.
16				2860	3,1	64,7	1,54	12,0	7,8	-	42	1,7	83	Fir.ang.	Fir.ang.
16				2860	3,1	56,7	1,46	12,7	8,7	-	39	1,4	68	Fir.ang.	Fir.ang.
16				2860	3,1	52,8	1,49	13,8	9,3	-	35	1,2	59	Fir.ang.	Fir.ang.
16	*			2860	3,1	58,6	1,39	10,8	7,8	-	42	1,7	83	Fir.ang.	Fir.ang.
16	*			2860	3,1	55,0	1,41	12,2	8,7	-	39	1,4	68	Fir.ang.	Fir.ang.
17	Ejektor			Turbo Verd. Linde	90,0/19,8/7,5	11097	7,2	49,5	1,85	10,3	3,6	1,9	27	0,7	104
17	VOEST	11097	7,2			48,4	1,88	10,5	3,5	2,0	26	0,6	100	Fir.ang.	V-,A-Met.
17		11097	7,2			39,3	1,67	10,3	3,7	2,4	24	0,5	83	Fir.ang.	V-,A-Met.
17	**	11183	7,2			28,1	1,29	9,5	4,0	3,3	22	0,4	65	Fir.ang.	V-,A-Met.

\* Versuch mit Detergentien

\*\* Versuch unter Betriebsbedingungen

mit Belüfterplatten belegt. Auch hier wurden, wie schon bei den feinblasigen Belüftungssystemen, höhere Werte für die spez. Sauerstoffzufuhr und Sauerstofftrag wie erwartet gemessen.

Das Belüftungssystem der Anlage 16 ist eine Ejektorbelüftung der Firma Penberthy. Bei einer Einblastiefe von ca. 3 Meter ist die Ejektorbelüftung hier in einem ungünstigen Bereich eingesetzt. Eine getrennte Leistungserfassung für Gebläse und Umwälzpumpen war nicht möglich. Die Einblasenergie wurde mit der Gesamtenergie berechnet. Es wurden 2 Versuche mit 5 mg/l Detergentien durchgeführt, wobei die Sauerstoffzufuhr ca. 5 % unter den in Reinwasser ermittelten Werten lag.

Anlage 17 ist mit einem von der VÖEST weiterentwickelten Ejektorbelüftungssystem ausgerüstet, wobei alle Düsen in eine Richtung zeigen und damit eine Strömung induzieren. Bei einem Versuch unter Betriebsbedingungen mit ansteigendem Sauerstoffgehalt wurde  $\alpha = 0,89$  ermittelt. Bei Versuchen in letzter Zeit wurde die Sauerstoffzufuhr unter Betriebsbedingungen durch Messung des Sauerstoffgehaltes der aus dem Belebungsbecken austretenden Luft nach Gleichung (2) bestimmt.

$$OC'_{L-ET} = \frac{300}{7,2} \cdot \frac{100 - 84}{100} \cdot \frac{10,4}{10,4 - 2} = 8,3 \text{ g/Nm}^3 \cdot \text{m}$$

Mit den während des Versuches herrschenden Anlagen- und Versuchsparametern ermittelt man  $OC' = 4,8$  g/m<sup>3</sup>·h. Hier bestimmt man den  $\alpha$ -Wert zu  $0,88$ . Die Ermittlung der  $\alpha$ -Werte erfolgte indirekt über Diagramm 1.



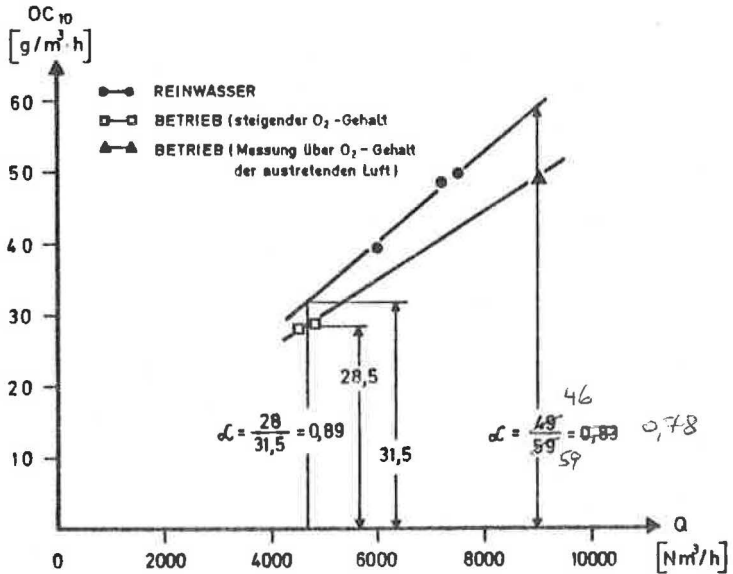


Diagramm 1: Sauerstoffzufuhr-Luftmenge

### 3.4 Anlagen mit Stabwalzenbelüftung

Durch Einbauten im Belebungsbecken ist eine Optimierung des Systems möglich. Auf Anlage 20 wurden Versuche zur Optimierung der Sauerstoffzufuhr durchgeführt.

Auf dieser Anlage wurde der Sauerstoffertrag unter Betriebsbedingungen nach Gleichung 1 im Mittel zu  $1,76 \text{ kg O}_2/\text{kWh}$  berechnet. Versuche mit steigendem Sauerstoffgehalt ergaben einen Sauerstoffertragswert von im Mittel  $1,58 \text{ kg O}_2/\text{kWh}$ . Hieraus errechnet sich ein mittlerer  $\alpha$ -Wert von  $0,86$ .

Die Versuche auf Anlage 21 dienten dem Vergleich verschiedener Rotorsysteme.

Auf weiteren 5 Anlagen mit Stabwalzenbelüftung wurde ein Ertragswert unter Betriebsbedingungen nach Gleichung 1 von im Mittel  $1,70 \text{ kg/kWh}$  berechnet.

TABELLE 4 : SAUERSTOFFZUFUHRVERSUCHE MIT STABWALZEN

Anl.	Bel.S.	L/B/T	B.Form	Rot. Abs.	Vol.	ET	OC <sub>10</sub>	O <sub>P</sub>	OC/m <sub>R</sub>	P/m <sub>R</sub>	P <sub>BB</sub>	V/m <sub>R</sub>	Leistm.	Bemerkung
		m		m	m <sup>3</sup>	cm	$\frac{g}{m^3 \cdot h}$	$\frac{kg}{kWh}$	$\frac{kg}{m_R \cdot h}$	$\frac{kW}{m_R}$	$\frac{W}{m^3}$	$\frac{m^3}{m_R}$		
18	Rotor	45,0/20,3/2,5	Umlauf	20	2013	30	170,2	2,04	9,5	4,7	84	56	kWh-Z.	
18	Passavant			20	2013	30	85,6	1,91	9,6	5,1	45	112	kWh-Z.	
19	Rotor	42,6/16,7/3,2	Umlauf	20	2102	31	118,0	1,44	8,3	5,7	82	70	A-,V-Met.	Leit+Brems
19	Passavant			20	2095	30	119,4	1,53	8,3	5,4	78	70	A-,V-Met.	Leit+Brems
20	Rotor	150,0/17,0/2,4	Umlauf	25	6200	28	77,8	1,71	8,0	4,7	46	103	kWh-Z.	Leit+Brems
20	Passavant			25	6200	27	80,0	1,84	8,3	4,5	44	103	kWh-Z.	Leit+Brems
20				25	6200	25	74,2	1,92	7,7	4,0	39	103	kWh-Z.	Leit+Brems
20				25	6200	29	84,0	2,13	8,7	4,1	40	103	kWh-Z.	Leitw.
20				25	6200	28	70,0	1,82	7,2	4,0	38	103	kWh-Z.	Leitw.
20				25	6200	27	73,5	1,98	7,6	3,9	37	103	kWh-Z.	Leitw.
21	Rotor	160,0/16,0/3,0	Umlauf	35	7548	25	61,7	1,59	7,9	5,0	39	126	kWh-Z.	stoßend stoßend schlepp. schlepp. stoßend Bremsw.
21	Waagner-				7496	23	61,9	1,73	7,9	4,6	37	125	kWh-Z.	
21	Biro				7677	30	65,5	1,80	8,4	4,7	37	128	kWh-Z.	
21					7471	22	53,3	1,79	6,8	3,8	31	125	kWh-Z.	
21					7278	15	41,5	1,59	5,3	3,3	28	121	kWh-Z.	
21					7677	30	69,2	1,82	8,9	4,9	38	128	kWh-Z.	
21	Rotor	160,0/16,0/3,0	Umlauf	35	7677	30	68,5	1,82	8,8	4,8	38	128	kWh-Z.	
21	Passavant				7677	30	68,5	1,82	8,8	4,8	38	128	kWh-Z.	
21					7471	22	64,0	2,36	7,9	3,4	27	125	kWh-Z.	
22	Rotor Pass	70,0/12,7/3,0	Umlauf	50	2460	20	31,5	1,89	6,5	3,4	17	205	Meßz.	Bremsw.
23	Rotor Pass	Øa=22/Øi=16/3	ringf.	-	1020	30	90,1	2,00	10,2	5,1	45	113	kWh-Z.	Leitw.
24	Rotor Pass	Øa=25/Øi=16/3	ringf.	-	861	28	57,6	1,64	8,3	5,0	35	144	kWh-Z.	

TABELLE 5 : SAUERSTOFFZUFUHRVERSUCHE MIT KREISELN

Anl.	Bel.Sy.	L/B/T	Vol.	Ø	v <sub>U</sub>	ET	OC <sub>10</sub>	O <sub>p</sub>	OC/Bei	P <sub>BB</sub>	Leistm.	Bemerkung
		m	m <sup>3</sup>	m	$\frac{m}{s}$	cm	$\frac{g}{m^3 \cdot h}$	$\frac{kg}{kWh}$	$\frac{kg}{Bei \cdot h}$	$\frac{W}{m^3}$		
25	Kreisel BSK	23,7/20,9/2,7	1400	3,15	5,5	10	138,5	1,64	194	85	kWh-Z.	Str.Einb.+Umb.Kr.
25			1400	3,15	4,7	10	84,6	1,57	118	54	kWh-Z.	Str.Einb.+Umb.Kr.
25			1400	3,15	3,3	10	32,4	1,49	45	22	kWh-Z.	Str.Einb.+Umb.Kr.
26	Kreisel Gyrox	23,7/20,9/2,7	1345	3,6	5,2	13	127,0	1,63	171	78	kWh-Z.	Str.Einb.+Umb.
26			1400	3,6	4,5	14	95,8	1,66	129	58	kWh-Z.	Str.Einb.+Umb.
26			1400	3,6	3,2	13	35,0	1,34	47	26	kWh-Z.	Str.Einb.+Umb.
27	Kreisel Vortair	16,0/7,5/2,5	300	1,3	?	2	86,3	1,60	13	54	kWh-Z.	
27			300	1,3		1	87,0	1,63	13	53	kWh-Z.	
27			300	1,3		-2	86,3	1,78	13	48	kWh-Z.	
28	Kreisel Passavant	12,0/12,0/3,0	467	1,8	4,5	40	122,5	1,67	57	73	kWh-Z.	
28			458	1,8	4,5	33	103,7	1,58	48	66	kWh-Z.	
28			456	1,8	4,5	31	101,6	1,61	46	63	kWh-Z.	
28			450	1,8	4,5	27	92,1	1,83	42	50	kWh-Z.	
28			450	1,8	3,0	31	42,5	1,58	19	27	kWh-Z.	
29	Kreisel Passavant	27,3/24,4/3,8 27,3/24,4/2,8	2533	1,8	4,5	30	72,3	1,78	46	41	kWh-Z.	Bel.Becken
29			1847	1,8	4,5	29	92,0	1,75	42	52	kWh-Z.	Stab.Beck.
30	Kreisel Passavant	13,0/13,0/3,5	625	2,3	4,6	31	103,8	1,62	65	64	kWh-Z+S.	Bel.B.1
30			622	2,3	4,6	29	98,4	1,64	61	60	kWh-Z+S.	Bel.B.1
30			618	2,3	4,6	27	88,1	1,82	55	48	kWh-Z+S.	Bel.B.1
30			588	2,3	4,6	9	29,6	1,38	17	21	kWh-Z+S.	Bel.B.1
30			618	2,3	4,6	27	84,4	1,65	52	52	kWh-Z+S.	Bel.B.2
30			618	2,3	3,0	27	36,7	1,46	23	25	kWh-Z+S.	Bel.B.2
30			589	2,3	4,6	10	35,5	1,44	21	25	kWh-Z+S.	Bel.B.2
30			589	2,3	3,0	10	16,3	1,43	10	11	kWh-Z+S.	Bel.B.2
31			Kreisel Passavant	16,0/16,0/3,7	1033	2,3	4,6	31	61,8	1,59	64	39
31	1023	2,3			4,6	27	51,3	1,65	53	31	kWh-Z+S.	

### 3.5 Anlagen mit Kreiselbelüftung

Die Anlagen 25 und 26 sind Teilbecken einer großen Anlage, wobei die von den Herstellern angegebenen Sauerstoffzufuhrwerte überprüft werden sollten. Außerdem wurde versucht, die Systeme zu optimieren, wobei verschiedene Strömungseinbauten im Belebungsbecken sowie Umbauten am Kreisel getestet wurden.

Bestimmung der Sauerstoffzufuhr unter Betriebsbedingungen nach Gleichung 1 ergab  $OC^* = 54 \text{ kg/h}$  und  $OP = 1,62 \text{ kg O}_2/\text{kWh}$ . Der Vergleich mit den im Reinwasser gemessenen Werten  $OC^* = 61 \text{ kg/h}$  und  $OP = 1,65 \text{ kg O}_2/\text{kWh}$  ergibt einen  $\alpha$ -Wert von 0,88.

Es ist noch darauf hinzuweisen, daß die Eintauchtiefe bei den verschiedenen Fabrikaten nicht einheitlich definiert ist.

## 4. LITERATUR

- KAYSER, R.: Ermittlung der Sauerstoffzufuhr von Abwasserbelüftern unter Betriebsbedingungen, Veröffentlichungen des Inst.f.Stadtbauwesen der TH Braunschweig, Heft 1, 1967.
- KAYSER, R.: Zur Frage der Überprüfung des Sauerstoffeintrages, 12. ÖWWV Seminar, Raach 1977, Wiener Mitteilungen Band 22.
- KAYSER, R.: Wirtschaftlichkeit verschiedener Belüftungssysteme unter Betriebsbedingungen, 17. ÖWWV Seminar, Ottenstein 1982, Wiener Mitteilungen Band 47.

FREY Wilhelm, Dipl.Ing  
Institut für Wassergüte und Landschaftswasserbau  
der Technischen Universität Wien  
A-1040 Wien, Karlsplatz 13



## REGELUNG DER BELÜFTUNG

Kayser, R.

### 1. ZIELE DER BELOFTUNGSREGELUNG

Grundvoraussetzung für die Abwasserreinigung nach dem Belebungsverfahren ist die ausreichende Versorgung des belebten Schlammes mit Sauerstoff. Solange der Kohlenstoffabbau im Vordergrund stand, war die Regelung der Sauerstoffzufuhr nach dem Sauerstoffgehalt das Standard-Regelverfahren. Es setzt streng genommen total durchmischte Becken voraus. Die Belüftung wird so geregelt, daß ein minimaler Sauerstoffgehalt von 1,0-2,0 mg/l eingehalten wird. Dadurch, daß höhere Sauerstoffgehalte vermieden werden, wird zugleich ein wirtschaftlicher Betrieb gewährleistet.

Seine Grenzefand dieses Verfahren mit der Verbreitung von Umlaufbecken mit punktueller Belüftung (z.B. Mammutrotoranlagen, Karussellanlagen und auch Schreiber-Gegenstromanlagen), weil hierin der Sauerstoffgehalt einen sägezahnartigen Verlauf hat, der bei Zu- und Abschalten von Belüftern auch seine Form ändert.

Die zunehmende Forderung nach Nitrifikation (Oxydation des Ammoniums zu Nitrat) gebietet aus betrieblichen Gründen (Rückgewinn an Pufferung, Reduzierung von Schwimmschlamm auf den Nachklärbecken und Energieeinsparung) auch die weitgehende Denitrifikation (Entfernung des Nitrates). Dies läßt sich nach dem Verfahren der simultanen Denitrifikation in Misch- und Umlaufbecken erreichen, wenn die Belüftung so geregelt wird, daß genügend oxisches (mit Sauerstoff versorgtes) Volumen zur Verfügung steht und zugleich für die Denitrifikation ausreichend anoxisches (sauerstoffreies) Volumen verbleibt. Mit einer Regelung der Belüftung nach dem Sauerstoffgehalt ist dies nicht zu erreichen.

## 2. ÜBERSICHT ZU DEN REGELSTRATEGIEN

Folgende Regelstrategien werden heute angewendet:

- Programmsteuerung mittels einfacher Zeitschaltuhren, Programmschaltwerken oder Computern. In der Regel für kleinere Kläranlagen mit weitgehend konstanten Zuflußverhältnissen. Das Programm wird nach Betriebsmessungen (z.B. Sauerstoffgehaltsaufzeichnungen, Nitrat- und Ammoniumgehaltsmessungen) angepaßt. Programmsteuerung ist sowohl für nur BSB<sub>5</sub>-Abbau als auch für simultane Denitrifikation einsetzbar.
- Regelung nach dem Sauerstoffgehalt. Problematisch in längsdurchflossenen Druckluftbecken und bei Kreiseln in Reihe. In Umlaufbecken meist nicht sinnvoll.
- Regelung nach dem Sauerstoffverbrauch. Ist anwendbar für BSB<sub>5</sub>-Abbau als auch für simultane Denitrifikation.
- Regelung mit dem Schreiber-O<sub>2</sub>-Minimator. Das Meßprinzip basiert auf einer Trübungsmessung des gereinigten Ablaufes. Es ist nach vorliegenden Erfahrungen für BSB<sub>5</sub>-Abbau und für simultane Denitrifikation einzusetzen.
- Regelung nach dem Ammonium- oder Nitratgehalt. Ist nur für Anlagen, die nitrifizieren, anwendbar.

## 3. PRAKTISCHE BEISPIELE

### 3.1 Programmsteuerung

Die Kläranlage Bederkesa ist als Schreiber-Gegenstromrundbecken für aerobe Schlammstabilisierung für 8000 EGW ausgelegt. Sie ist z.Zt. zu rd. 60% ausgelastet. Aus diesem Grunde werden der Anlage relativ große Mengen an Fäkalschlamm aus Hauskläranlagen zugeführt. Zur Belüftungssteuerung (4 Gebläse) ist, wie auf den meisten Schreiber-Anlagen, ein Zeitschaltwerk vorhanden. Der Klärwärter bestimmt

täglich ein- bis zweimal vom Filtrat des belebten Schlammes den Ammonium- und Nitratgehalt und korrigiert danach ggf. das Belüftungsprogramm. Es gelingt ihm auf diese Weise, den Stickstoffgehalt ( $\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$ ) im Ablauf auf unter 10 mg/l zu halten (Zulauf ca. 60 mg/l nur vom Hausabwasser).

### 3.2 Regelung nach dem Sauerstoffgehalt

Hier soll nur auf ein in England durchgeführtes Vorhaben zur verbesserten Regelung der Belüftung von längsdurchflossenen Belebungsbecken mit Druckbelüftung hingewiesen werden. Das Becken war in vier Kaskaden aufgeteilt. Jede Kaskade erhält eine von der Hauptleitung abzweigende Luftzuleitung und eine Sauerstoffgehaltsmessung. Über einen Regler (programmierbarer logischer Regler, PLC) wird ein Ventil angesteuert, welches die Luftzufuhr regelt. Am Anfang der Hauptluftleitung befindet sich eine Druck- und Mengenmessung, über die mittels eines weiteren PLC die Gebläse geschaltet werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß eine Aufteilung in zwei Kaskaden hinreichend ist (BURKE et al, 1985). Die Einsparungen an Belüftungsenergie waren in einer nitrifizierenden Anlage beträchtlich. In einer nicht nitrifizierenden Anlage ergaben sich kaum Verbesserungen.

Es ist darauf hinzuweisen, daß das Prinzip einer solchen Regelung auf der Hauptkläranlage Wien zur Steuerung der Drehzahl der Kreisel angewendet wird.

### 3.3 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 (v.d.EMDE, 1975). Für das Klärwerk Braunschweig, eine Anlage ähnlich wie Wien-Blumental, haben wir eine einfachere Meßeinrichtung entwickelt (Abb. 1). Ein quadratisches Gefäß hängt im Belebungsbecken, es faßt etwa 40 l und wird konstant von einem kleinen Becker-Gebläse grobbläsig belüftet. Belebter Schlamm wird mit einem Schöpffarm aus PVC-Rohren  $\varnothing$  50 mm in das Belüftungsgefäß gefördert. Die Aufenthaltszeit beträgt etwa 20 Minuten. Die Sauerstoffelektrode wird über ein seitlich ange-



schweißtes Rohr in das Becken geführt. Sie kann so leicht gewartet werden, und sie verhängt sich nicht mit Fetzen. Diese einfache und robuste Meßeinrichtung läuft in Braunschweig in einer Anlage ohne Vorklärung klaglos seit vier Jahren. In Deutschland wird diese Meßeinrichtung von der Fa. Passavant vertrieben.

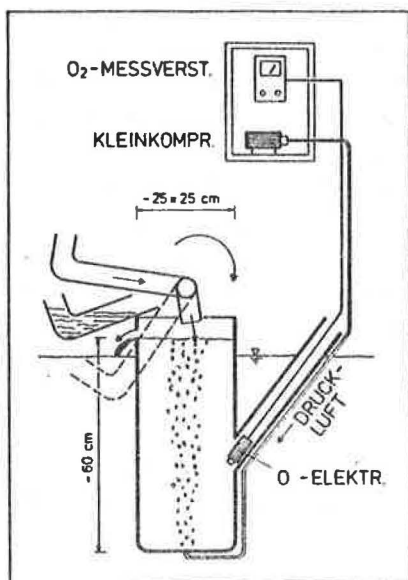


Abb. 1: Kontinuierliche Sauerstoffverbrauchs-  
messung System Braunschweig (KAYSER, 1983)

### 3.4 Regelung mit dem Schreiber- $O_2$ -Minimator

Das Prinzip des Schreiber- $O_2$ -Minimators ist auf Abb. 2 dargestellt. Aus dem Belebungsbecken wird ein konstanter Strom an belebtem Schlamm in ein trichterförmiges Absetzbecken geleitet. Das ablaufende geklärte Wasser passiert eine Trübungsmessung. Damit sich belebter Schlamm im Absetzbecken nicht ansammelt, wird ständig ein konstanter Schlammstrom in das Belebungsbecken zurückgefördert.

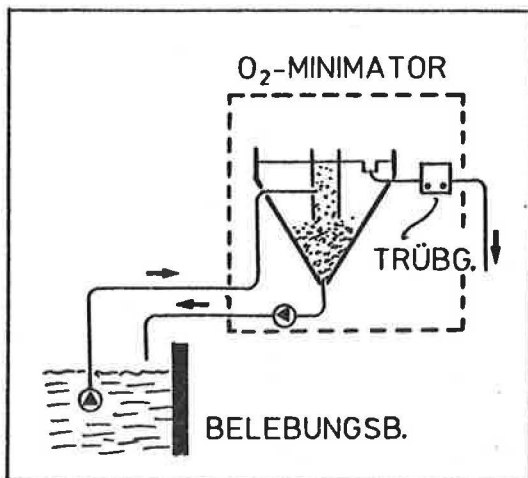


Abb. 2: Schreiber-O<sub>2</sub>-Minimator (Schema)

Die Belüftung wird so geregelt, daß die Trübung in einem relativ schmalen Bereich gehalten wird.

Die Kläranlage Bissendorf, bestehend aus zwei Schreiber Gegenstrom-Rundbecken und einem Nachklärbecken, ist für 10.000 EGW ausgelegt und z.Zt. zu 60-65% ausgelastet. Die Belüftung wird mittels Schreiber-O<sub>2</sub>-Minimator geregelt. Die Betriebsaufzeichnungen der Eigenüberwachung ergaben für Juli 1985 folgende Mittelwerte:

	Zulauf	Ablauf
BSB <sub>5</sub>	330 mg/l	4,5 mg/l
CSB	-	40,3 mg/l
NH <sub>4</sub> -N	68,6 mg/l	2,3 mg/l
NO <sub>3</sub> -N	-	4,6 mg/l

Es ist für mich erstaunlich, daß mit einem so unspezifischen Meßverfahren zur Belüftungsregelung so gute Ablaufergebnisse erzielt werden können.

### 3.5 Regelung nach dem Ammonium- oder Nitratgehalt

Das Grundschemata eines solchen von Ermel (1983) entwickelten Regelsystems ist auf Abb. 3 dargestellt.

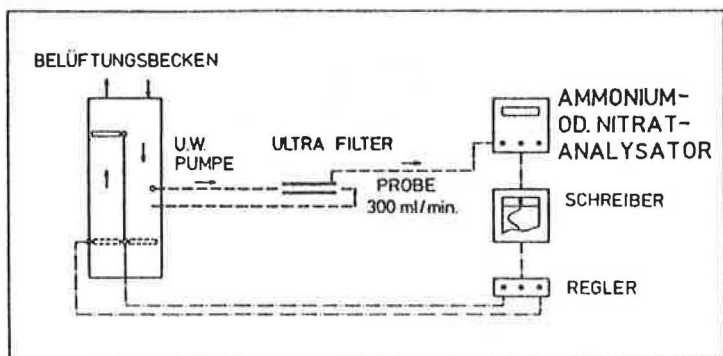


Abb. 3: Automatische Belüftungsregelung nach dem Nitrat- oder Ammoniumgehalt

Aus dem Belebungsbecken wird belebter Schlamm durch ein Ultrafilter in solcher Menge gefördert, daß die Fließgeschwindigkeit im Ultrafilter  $v > 3,5$  m/s ist. Hierdurch wird vermieden, daß sich an der Schlauchmembran ein Filterkuchen aufbaut. Der schwebstofffreie Probenstrom wird einem Nitrat- oder Ammoniumanalysator zugeführt. Über einen Regler werden dann die Belüfter ein- bzw. ausgeschaltet.

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.

Wenn das Belebungsbecken eine 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 die Regelung nach dem Ammoniumgehalt 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  $\text{BSB}_5\text{:N}$ -Verhältnisses.

Bestehen keinerlei Forderungen zum Stickstoffgehalt im Ablauf, so ist die Regelung nach dem Nitratgehalt am günstigsten, weil bei niedrigen Nitratgehalten im Ablauf der Energieverbrauch für die Belüftung am geringsten ist und Schwimmschlamm auf der Nachklärung fast nicht auftreten kann.

Mehrjährige Erfahrungen mit der Belüftungsregelung nach dem Nitratgehalt liegen von der Kläranlage Salzgitter vor. Hier entwickelte Ermel (1983) seine Nitratsteuerung. Bei der Anlage handelt es sich um eine Schwachlastbelebungsanlage ohne Vorklärung, sie wurde für Teilstabilisierung des Schlammes bemessen. Heute beträgt die Raumbelastung etwa  $B_R = 0,35 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$ , die Schlammkonzentration schwankt zwischen 5 und  $7 \text{ kg/m}^3$ . Im Zulauf hat man durchschnittlich  $55 \text{ mg/l}$  TKN.

In jedem der zwei Becken läuft je ein Rotor im Dauerbetrieb. Die übrigen je zwei Rotoren werden nach dem Nitratgehalt geschaltet (präziser: nach dem Gehalt an Nitratstickstoff plus Nitritstickstoff,  $\text{NO}_x\text{-N}$ , da im Analysator Nitrat zu Nitrit reduziert und Nitrit gemessen wird). Im Sommer sind der Nitrat- und der Ammoniumgehalt mit je  $0\text{-}3 \text{ mg/l}$  N gering. Im Winter kann der Ammoniumgehalt bis auf  $20 \text{ mg/l}$  steigen. Im November 1984 wurde parallel zur Nitratmessung eine kontinuierliche Ammoniummessung vorübergehend einge-

baut. Beide Ganglinien sind in Abb. 4 zu sehen. Während der Nitratgehalt im Ablauf konstant gehalten wird, schaukelt sich der Ammoniumgehalt im Laufe des Tages stetig auf. Die Gradienten des Ammoniumgehaltes sind stets denen des Nitratgehaltes entgegengesetzt. Wäre hier nach dem Ammoniumgehalt geregelt worden, hätte die Nitrat-Ablaufkonzentration entsprechend hohe Werte angenommen.

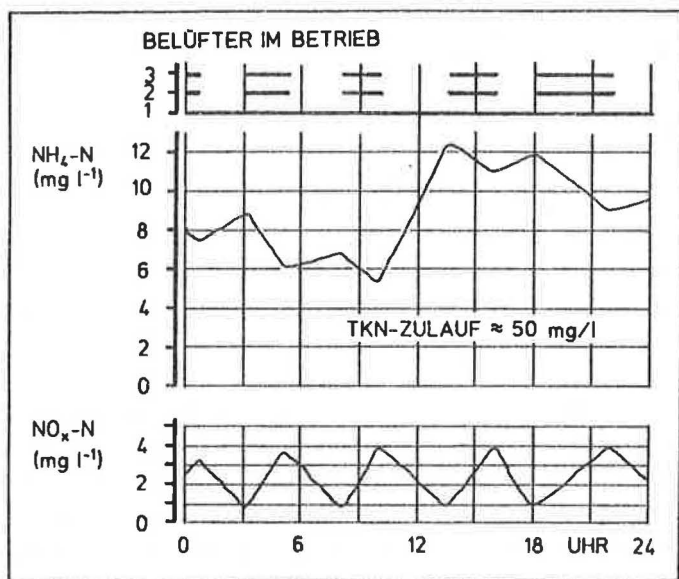


Abb. 4: Ganglinie des Nitrat- und Ammoniumgehaltes bei automatischer Regelung (Winterverhältnisse)

Bei der Tierkörperverwertungsanstalt Icker wurde ein neues Karussell-Belebungsbecken gebaut (Abb. 5). Das Abwasser ist sehr konzentriert:  $\text{BSB}_5 \approx 1500\text{-}3000$  mg/l,  $\text{TKN} \approx 500\text{-}1000$  mg/l. Da das gereinigte Abwasser zunächst in einen Bach fließt, der praktisch kein Wasser führt und später in ein kleines Gewässer gelangt, welches Fischteiche durchfließt, bestand hier die Forderung nach weitgehender Nitrifikation und soweit möglich auch nach Denitrifikation. Im praktischen Betrieb bei Raumbelastungen von  $0,25$  kg/m<sup>3</sup>·d und Schlamm-

belastungen von 0,05 kg/kg·d hat sich gezeigt, daß sich dieses Abwasser sowohl gut nitrifizieren als auch problemlos denitrifizieren läßt, obwohl  $BSB_5:N = 3,0$  an der Untergrenze des allgemein als günstig für die Denitrifikation angesehenen Verhältnisses liegt. Offenbar spielt die Abbaubarkeit noch eine Rolle: Im TKV-Abwasser bestehen die organischen Stoffe überwiegend aus organischen Säuren, die als leicht abbaubar gelten.

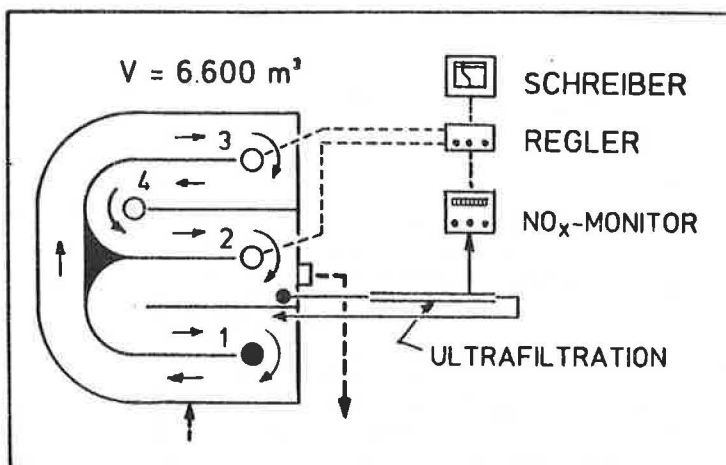


Abb. 5: Belebungsbecken mit Regelsystem TKV Icker

Auch hier wurde die Belüftung nach dem Nitratgehalt im Belebungsbecken geregelt. Ein Kreislauf lief ständig. Über die Regelung wurden zwei Kreisläufe zugeschaltet und zwar mit den Grenzwerten bei 5 und 3 mg/l  $NO_x-N$  für den ersten zuzuschaltenden Kreislauf und 3 und 0,5 mg/l für den zweiten. Auf Abb. 6 sind zwei Ganglinien dargestellt.

Am Wochenbeginn bei geringen Belastungen, schaltete sich nur der Kreislauf mit den hohen Grenzwerten zu (Abb. 6, oben). Mit steigender Belastung, zum Wochenende hin, stiegen der Sauerstoffverbrauch und damit auch die Denitrifikationsraten, der  $NO_x-N$ -Gehalt sank und

erreichte den Einschaltpunkt ( $0,5 \text{ mg/l NO}_x\text{-N}$ ) des dritten Kreisel. Jetzt liefen zwei Kreisel dauernd und der dritte schaltete sich nach Bedarf zu. Mit dieser Regelung konnten bei Zulaufkonzentrationen von im Mittel  $750 \text{ mg/l N}$  Ablaufkonzentrationen von rd.  $10 \text{ mg/l N}$  ( $\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$ ) eingehalten werden.

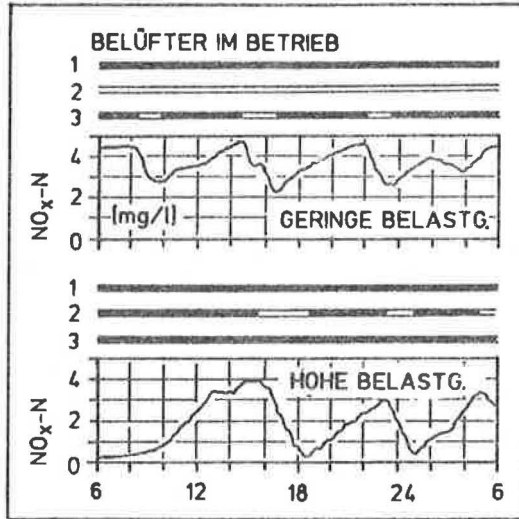


Abb. 6: Ganglinie des Nitratgehaltes,  
TKV Icker

#### 4. SCHLUSSBEMERKUNG

Zur Einhaltung stabiler Betriebsverhältnisse und zugleich eines wirtschaftlichen Betriebes sind in Zukunft bei erhöhten Anforderungen an die Reinigung komplexe Regelstrategien für die Belüftung anzuwenden.

Voraussetzung ist in jedem Fall eine gute Abstufung der Belüftungsleistung. Zu bevorzugen sind Belüftungssysteme, die auch bei verringerter Leistung noch gute Sauerstoffträge haben.

5. LITERATUR

- BURKE T. Treatment Process Management and Control. Proc.  
HAMILTON I.M. 4. IAWPRC Workshop Houston and Denver 1985 "Instru-  
TOMLINSON E.I.: mentation and Control of Water and Wastewater  
Treatment and Transport Systems". Pergamon Press  
(1985), p. 421-428
- v.d.EMDE W.: Die Kläranlage Wien-Blumental, Betriebsergebnisse  
einer Belebungsanlage ohne Vorklärung zur weiter-  
gehenden Entfernung von Kohlenstoff und Stickstoff-  
verbindungen, DAR, 1975, S. 7-82
- ERMEL G.: Stickstoffentfernung in einstufigen Belebungs-  
anlagen - Steuerung der Denitrifikation. Veröffent-  
lichungen des Inst. f. Stadtbauwesen, TU Braun-  
schweig, Heft 35, 1983.
- KAYSER R.: Möglichkeiten und Grenzen der Walzenbelüftung im  
Umlaufbecken. Berichte der ATV, Nr. 35 (1983),  
S. 693-705.

KAYSER Rolf, Prof. Dr.-Ing.  
Technische Universität Braunschweig  
Institut für Stadtbauwesen  
Abt. Siedlungswasserwirtschaft  
Postfach 3329  
D-3300 Braunschweig





## REGELUNG DER BELÜFTUNG

Schlegel, S.

### 1. Vorbemerkungen

Zur Sicherstellung der Reinigungsleistung von Belebungsanlagen ist die Zufuhr des erforderlichen Sauerstoffes von wesentlicher Bedeutung. Da bis zu 2/3 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. Dieser schwankt infolge der zum Teil erheblichen Unterschiede in der Verschmutzungsfracht in relativ weiten Grenzen. Darüber hinaus haben Verfahrens- und Betriebsführung ebenfalls einen bedeutenden Einfluß auf den Sauerstoffbedarf.

Primär kann der Energieaufwand durch die Wahl eines Belüftungssystems mit hohen Sauerstoffträgen reduziert werden. Darüber hinaus spielt die Sauerstoffkonzentration eine erhebliche Rolle. Da der Stoffumsatz vom Sauerstoffgehalt im Belebungsbecken, der sog. "treibenden Konzentrationsdifferenz" abhängig ist, muß die Sauerstoffzufuhr  $\alpha \cdot OV$  höher als der Sauerstoffverbrauch  $OV$  angesetzt werden:

$$\alpha \cdot OV = \frac{C_S}{C_S - C_X} \cdot OV$$

### 2. Regelstrategien

Der Aufwand für eine Sauerstoffeintragsregelung richtet sich zum einen nach den Anforderungen an die Ablaufqualität, zum anderen nach wirtschaftlichen Grundsätzen, die sich aus einer Kosten-Nutzen-Analyse ergeben. Je ausgeprägter die Störgrößen, je höher die Schlammbelastung und je größer die Anlage ist, desto zuverlässiger muß der erforderliche Sauerstoff verfügbar sein.

Mit einer einfachen Zeit-Pausen-Steuerung kann auf kleineren Anlagen der Energieverbrauch bereits wirkungsvoll vermindert werden.

Mit der zusätzlichen Installation einer kontinuierlichen Sauerstoffmessung und Registrierung wird darüber hinaus besonders bei niedrig belasteten Belebungsanlagen eine wirkungsvolle Überwachung erreicht, da der Klärwärter die Zeit-Pausen-Steuerung jederzeit den geänderten Belastungsverhältnissen anpassen kann.

Die Automatisierung dieses Vorganges führt zur Regelung, bei der der Sauerstoffeintrag kontinuierlich oder quasi kontinuierlich dem Bedarf angepaßt wird. Eine Regelung des Sauerstoffeintrages nach einer vorgegebenen Sauerstoffkonzentration  $C_x$  im Belebungsbecken bedeutet praktisch eine Regelung nach dem Sauerstoffbedarf OV:

$$C_x = C_s \left( 1 - \frac{OV}{\alpha \cdot OC} \right)$$

Der bei nitrifizierenden Anlagen vorgeschlagenen Regelung der Belüfter über die Nitratkonzentration kann nur zugestimmt werden, wenn die Anlage entweder sehr schwach belastet oder das Ziel dieser Anlage nur der Abbau der organischen Kohlenstoffverbindungen ist. Eine Garantie dafür, daß ausreichend niedrige Ammoniumkonzentrationen eingehalten werden, kann hiermit jedoch nicht gegeben werden.

Wichtig für die Regelung des Sauerstoffeintrages nach der Sauerstoffkonzentration ist, daß

der Sauerstoffgehalt genau genug gemessen wird,

die Messung an einer Stelle erfolgt, an der eine Änderung des

Sauerstoffbedarfes früh genug erkannt wird und

die Eintragsaggregate und -regelungen so ausgelegt sind, daß die

Sauerstoffeintragsleistung einer Bedarfsänderung ausreichend schnell folgen kann.

### 3. Erforderliche Sauerstoffgehalte

Auf dem Markt werden eine Reihe verschiedener Sauerstoffmeßgeräte angeboten, die nur zum Teil die Anforderung an eine genaue Messung,

die vor allem für den unteren Konzentrationsbereich überaus wichtig ist, Zuverlässigkeit und Wartungsfreundlichkeit erfüllen. Hierüber wird in absehbarer Zeit ein vom UBA geförderter, bei den Berliner Entwässerungswerken mit Unterstützung des ATV-FA. 2.13 "Automatisierung von Kläranlagen" erarbeiteter Ergebnisbericht erscheinen.

Aus Abb. 1 folgt, daß erhebliche Energiemengen eingespart werden können, wenn die Belebungsbecken mit möglichst niedrigen Sauerstoffgehalten betrieben werden. Vermindert man z.B. die  $O_2$ -Konzentration im Belebungsbecken von 2 auf  $1 \text{ g/m}^3$ , reduziert sich der zugehörige Energieverbrauch um ca. 10 %.

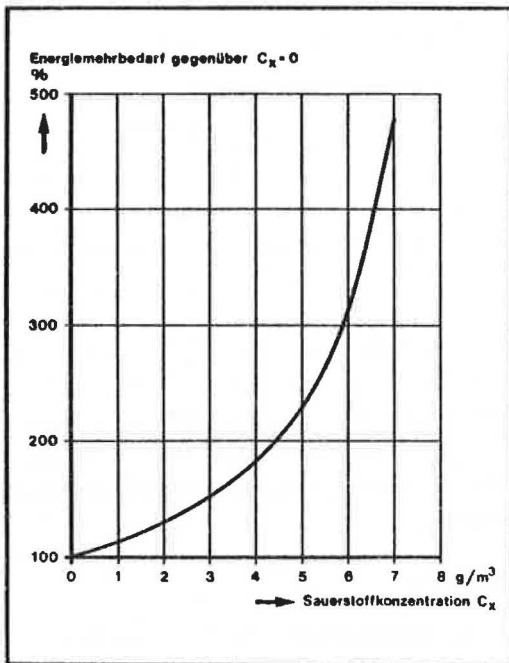


Abb. 1 Energiemehrbedarf verschiedener Sauerstoffbetriebskonzentrationen  $C_x$  gegenüber  $C_x = 0$

Empfohlen wird, die Belebungsbecken mit einer Sauerstoffkonzentration von  $0,5$  bis  $2 \text{ g/m}^3$  zu betreiben. In Anbetracht der Bedeutung dieses Wertes für den Energieverbrauch sollte die einzuhaltende Sauerstoffkonzentration jedoch differenzierter betrachtet werden.

Es gilt generell, daß die Sauerstoffgehalte in den Belebungsbecken umso niedriger gehalten werden können, je geringer sie belastet sind. Höher belastete Anlagen mit  $B_{T5} \geq 0,3 \text{ kg/(kg} \cdot \text{d)}$  sollten in allen Beckenzonen eine Sauerstoffkonzentration  $> 0,5 \text{ g/m}^3$  aufweisen. Empfohlen wird ein Regelbereich zwischen  $1$  und  $2 \text{ g/m}^3$ .

Bei nitrifizierenden Anlagen mit  $B_{T5} \leq 0,15 \text{ kg/(kg} \cdot \text{d)}$  sollte der Regelbereich zwischen  $0,5$  und  $1,5 \text{ g/m}^3$  liegen, wobei auch ein gelegentliches kurzfristiges Unterschreiten der Grenzwerte in Kauf genommen werden kann.

Stabilisationsanlagen mit  $B_{T5} \leq 0,05 \text{ kg/(kg} \cdot \text{d)}$  können noch niedriger gefahren werden. Für sie gilt insbesondere, daß die Pufferkapazität gegenüber Belastungsschwankungen und damit die Stabilität so groß ist, daß Sauerstoffkonzentrationen von unter  $1 \text{ g/m}^3$  in der Regel möglich sind.

Der Energiemehrverbrauch von schwächer belasteten nitrifizierenden Anlagen kann somit teilweise durch eine Reduzierung des Sauerstoffgehaltes kompensiert werden. Eine weitere wesentliche Energieminderung ergibt sich bei diesen Anlagen aus der Möglichkeit, durch das Einrichten von anoxischen Zonen, den Nitratsauerstoff für den biologischen Abbau zu aktivieren.

#### 4. Meßstelle für den Sauerstoffgehalt

Wird die Sauerstoffzufuhr in Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken geregelt, ist die richtige Wahl der Meßstelle von Bedeutung. Dabei spielt der Reaktortyp eine besondere Rolle (Abb. 2).

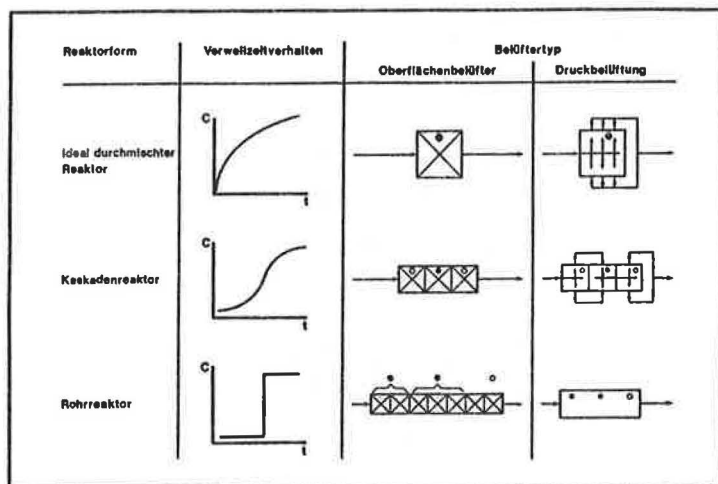


Abb. 2 Verweilzeitverhalten und Anordnung der Sauerstoffmeßstellen im Belebungsbecken

Beim vollkommen durchmischten Becken ist es theoretisch gleichgültig, an welcher Stelle gemessen wird. Tatsächlich muß jedoch der Belüftertyp berücksichtigt werden. Zu beachten ist, daß bei Oberflächenbelüftern infolge des punktuellen Sauerstoffeintrages und des Zehrungsverhaltens im Becken an der Beckenoberfläche höhere  $O_2$ -Konzentrationen auftreten als im übrigen Beckenbereich (Abb. 3).

Die Sauerstoffmeßsonde sollte daher entweder nicht so angeordnet werden, daß gerade dieser Bereich erfaßt wird, oder die Sauerstoffkonzentration ist, dem Durchschnitt des Beckeninhaltes entsprechend, höher zu wählen.

Bei einer Druckluftbelüftung wird - zumal bei flächiger Anordnung - ein wesentlich gleichmäßigeres  $O_2$ -Konzentrationsprofil erreicht. Hier ist zu berücksichtigen, daß die  $O_2$ -Messung durch den aufsteigenden Luftblasenstrom beeinträchtigt werden kann.

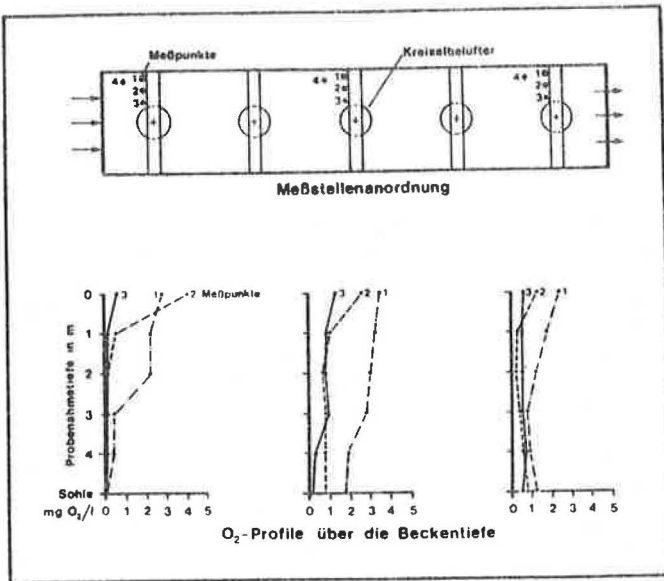


Abb. 3 Verteilung der Sauerstoffkonzentration in einem Belebungsbecken mit Oberflächenbelüftung

Bei Kaskaden liegt der günstigste Meßpunkt für eine Regelung etwa im 2. Drittel des Beckenvolumens, da hier eine Änderung des Sauerstoffbedarfes immer noch ausreichend schnell erfaßt werden kann. Bei größeren Anlagen mit entsprechenden Eingriffsmöglichkeiten sollte ggf. die Sauerstoffzufuhr in den einzelnen Bereichen getrennt geregelt werden, um dem unterschiedlichen Sauerstoffbedarf besser Rechnung tragen zu können.

Regeltechnisch am ungünstigsten sind längsdurchströmte Becken, bei denen Abwasser und Rücklaufschlamm vor Kopf aufgegeben werden. Da die Zehrung in den einzelnen Beckenabschnitten sehr unterschiedlich ist, kann schwerlich eine gleichbleibende Sauerstoffkonzentration längs des Beckens eingehalten werden. Die Meßstelle sollte wie auch bei der Kaskade etwa im 1. Drittelpunkt des Belebungsbeckens liegen. Bei größeren Anlagen kann es zweckmäßig sein, die Sauerstoffzufuhr einzelner Beckenabschnitte getrennt zu regeln.

Die Regelung mehrerer parallel betriebener Belebungsbecken durch ein Vergleichsbecken ist nur dann zweckmäßig, wenn sichergestellt ist, daß die Abwasserzufuhr zu den einzelnen Becken einigermaßen gleichmäßig erfolgt. Dabei sollte man sich an dem Becken orientieren, in dem die ungünstigsten Verhältnisse herrschen.

Der günstigste Meßpunkt für eine Regelung kann zumeist erst vor Ort ermittelt werden, nachdem das Sauerstoffkonzentrationsprofil bei verschiedenen Belastungsverhältnissen aufgenommen wurde.

##### 5. Maschinenverhalten und Zufuhrcharakteristik

Auf kommunalen Kläranlagen mittlerer Größe sollte die Sauerstoffzufuhr in einem Bereich von etwa 5 : 1 zu regeln sein.

Vielfach wird der untere Arbeitspunkt für den Sauerstoffeintrag durch die Mindestströmungsgeschwindigkeit im Belebungsbecken zur Vermeidung von Ablagerungen vorgegeben. Gerade auf neueren Anlagen werden hierdurch die Möglichkeiten für eine Regelung stark eingeschränkt.

Der Arbeitsbereich eines Belüftungssystems ergibt sich aus seiner Sauerstoffzufuhrcharakteristik. Diese kann im wesentlichen den Ergebnissen aus den Sauerstoffzufuhrversuchen entnommen werden.

Die einzelnen Belüftungssysteme weisen im Ertrag eine unterschiedliche Abhängigkeit von der Energiedichte auf. Für eine wirtschaftliche Regelung sind Belüfter mit flachem Verlauf der Ertragskurve bei gleichzeitig hohem Niveau von Vorteil.

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 i.a. durch polumschaltbare Motore erreicht. Dies bedeutet aber, daß man sich auf 2, maximal 3, Stufen zu beschränken hat. Ein stufenloser Regelbereich kann über einen Frequenzumformer herbeigeführt werden. Dieser ist aber relativ kostenintensiv, da man pro kW mit etwa 6 000 bis 7 000 ö.S. an Investitionskosten zu rechnen hat. Preiswerter und einfacher ist dagegen eine Regelung der Eintauchtiefe über ein Ablaufwehr oder eine Drosselung. Hierbei muß nur darauf geachtet werden, daß die Verstellgeschwindigkeit gering genug ist, daß die damit verbundenen hydraulischen Belastungen nicht den Absetzvorgang in der Nachklärung beeinträchtigen. Vor einer Kombination aus Drehzahl- und Eintauchtiefenänderung muß aus diesem Grunde gewarnt werden, da in der Regel ein Übergang von einer Drehzahl zur anderen eine extreme Änderung der Wehrstellung erfordert. Die Höhenverstellung des Oberflächenbelüfters selbst wurde bislang wegen technischer Probleme nur selten ausgeführt.

In Anlagen mit Druckbelüftung wird die Sauerstoffzufuhr durch die Änderung des Luftmassenstromes beeinflusst. Dies geschieht über

- das Zu- und Abschalten von Maschinensätzen
- Eintrittsleitschaufelverstellung (Vordrallregler)
- Leitschaufelverstellung auf der Druckseite (Verstelldiffusor)
- Drehzahleinstellung.

Die Änderung des Luftmassenstromes durch einen Vordrallregler oder einen Verstelldiffusor wird bei Strömungsverdichtern ausgeführt. Bei diesem Gebläsetyp ist die Pumpgrenze, der Übergang vom stabilen zum instabilen Arbeitsbereich, unbedingt zu berücksichtigen. Aus diesem Grunde werden häufig die Verdrängungsverdichter, wie z.B. Drehkolben-gebläse, den Strömungsverdichtern (Turbogebälse) vorgezogen.

Der Einsatz einer Drehzahlregelung ist bei einer Druckluftbelüftung zumeist preiswerter durchzuführen als bei Oberflächenbelüftern, da bei einer Verwendung mehrerer Maschinen nur ein Gebläse mit einer Verstellmöglichkeit ausgerüstet werden muß. Die Erfahrung zeigt, daß mit einer

solchen Regelung ein weitgehend gleichmäßiger Sauerstoffgehalt garantiert werden kann. Bei drehzahlgeregelten Gebläsen ist auf den Einsatz geeigneter Motore zu achten (Kühlung).

Der Arbeitsbereich kombinierter Belüfter ergibt sich aus dem der Teilsysteme. Bei Strahlröhren z.B. gilt für die Druckluftversorgung das bereits Angeführte. Der Arbeitsbereich der Treibwasserversorgung wird durch das Betriebsverhalten der Kreiselpumpen vorgegeben. In der Regel wird jedoch der Treibwasserstrom konstant gehalten und der Luftstrom wie bei der Druckbelüftung verändert.

#### 6. Wirtschaftlichkeit

Aufgrund der inzwischen von verschiedenen Betriebsanlagen vorliegenden Regelergebnisse haben sich die in der Literatur genannten Einsparungen von 10 bis 40 % gegenüber Anlagen mit nicht automatischem Sauerstoffeintrag bestätigt.

Aufgrund von Kostenabschätzungen lassen erst Kläranlagen > 3000 EW eine Betriebskosteneinsparung durch eine Regelung erwarten. Eine Minderung der Ausgaben kann ggf. durch eine Steuerung nach Zeitplan erreicht werden. Der Wert einer Sauerstoffzufuhrregelung bzw. -steuerung darf jedoch nicht ausschließlich unter dem Aspekt möglicher Betriebskosteneinsparungen gesehen werden. Die Verbesserung der Betriebszuverlässigkeit ist vorrangig.

8. Literaturhinweise

n.n.

Sauerstoffkonzentrationsmessung,  
Regelung und Steuerung der Sauerstoff-  
zufuhr.

2. Arbeitsbericht des Fachausschusses  
2.13 "Automatisierung von Kläranlagen"  
Korrespondenz Abwasser 26. (1979) 2,  
Seite 78

ERMEL, G.

Stickstoffentfernung in einstufigen  
Belebungsanlagen - Steuerung der Deni-  
trifikation

Veröffentlichungen des Instituts für  
Stadtbauwesen der TU Braunschweig,  
Heft 35 (1983) ISSN0341-5805

LOHMANN, J. und  
SCHLEGEL, S.:

Erfahrungen zur Regelung und Steuerung  
des Sauerstoffeintrags, insbesondere  
im Hinblick auf mögliche Energieeinspa-  
rungen.

Gewässerschutz, Wasser, Abwasser  
Bd. 59 (1983), S. 561

SCHLEGEL, S. und  
LOHMANN, J.:

Die Regelung des Sauerstoffgehaltes in  
Belebungsanlagen.

Korrespondenz Abwasser 28 (1981) 8,  
S. 557

Dr.-Ing. Sigurd Schlegel  
Emschergenossenschaft/Lippeverband  
Kronprinzenstraße 24

4300 Essen 1

WIENER MITTEILUNGEN  
WASSER - ABWASSER - GEWÄSSER

Eine von den Wasserbauinstituten an der Technischen Universität Wien,  
dem Institut für Wasserwirtschaft der Universität für Bodenkultur u.  
dem Österreichischen Wasserwirtschaftsverband  
herausgegebene Schriftenreihe

and Nr.		Preis öS
1	Kresser, W.: Das Wasser (1968)	100,--
2	Breiner, H.: Die Gesetzmäßigkeiten der stationären Flüssigkeits- strömung durch gleichförmig rotierende zylindrische Rohre (1968)	200,--
3	von der Emde, W.: Abwasserreinigung - Grundkurs (1969)	vergriffen
4	4. Seminar ÖWWV, Raach 1969 Abwasserreinigungsanlagen Entwurf-Bau-Betrieb (1969)	vergriffen
5	5. Seminar ÖWWV, Raach 1970 Zukunftsprobleme der Trinkwasserversorgung (1970)	vergriffen
6	6. Seminar ÖWWV, Raach 1971 Industrieabwasser (1971)	vergriffen
7	7. Seminar ÖWWV, Raach 1972 Wasser- und Abfallwirtschaft (1972)	vergriffen
8	Schmidt, F.: Das vollkommene Peilrohr (Zur Methodik der Grundwasserbeobachtung) (1972)	250,--
9	Doleisch, M.: Über die Auswertung von Abflußmessungen auf elektronische Rechenanlagen Pruzinsky, W.: Über die Anwendung von radioaktiven Tracern in der Hydrologie (1972)	250,--
10	1. Hydrologie-Fortbildungskurs Hochschule für Bodenkultur (1972)	vergriffen
11	Gutknecht D.: Vergleichende Untersuchungen zur Berechnung von HW-Abflüssen aus kleinen Einzugsgebieten (1972)	vergriffen
12	8. Seminar ÖWWV, Raach 1973 Uferfiltrat und Grundwasseranreicherung (1973)	270,--
13	von der Emde W., Fleckseder H., Huber L., Viehl K.: Zellstoffabwasser - Anfall und Reinigung (1973)	vergriffen

Band Nr.		Preis ÖS
14	2. Hydrologie-Fortbildungskurs 1973 Hochschule für Bodenkultur (1973)	vergriffen
15	9. Seminar ÖWWV, Raach 1974 Neue Entwicklungen in der Abwassertechnik (1973)	vergriffen
16	von der Emde, W.: Praktikum der Kläranlagentechnik (1974)	vergriffen
17	Behr, O.: Stabilitätsuntersuchung von Abflußprofilen mittels hydraulischer Methoden u. Trendanalyse (1974)	250,--
18	3. Hydrologie-Fortbildungskurs 1975 Universität für Bodenkultur (1975)	180,--
19	1. Hydrologisches Seminar des ÖWWV 1976 Institut für Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur (1976)	180,--
20	11. Seminar ÖWWV, Raach 1976 Abfall- und Schlammbehandlung aus wasser- wirtschaftlicher Sicht (1976)	vergriffen
21	2. Hydrologisches Seminar des ÖWWV 1977 Institut für Hydraulik, Technische Univ. Wien (1977)	300,--
22	12. Seminar ÖWWV, Raach 1977 Abwasserreinigung in kleineren Verhältnissen (1977)	350,--
23	Baron W., Heindl W., Behr O., Reitinger J.: Methoden zur rechnerischen Behandlung von Grundwasserleitern (1977)	200,--
24	Begert, A.: Ein Beitrag zur Reinigung des Abwassers eines Chemie- faserwerkes eines chemischen Betriebes und einer Kokerei (1978)	vergriffen
25	Kroiss, H.: Ein Beitrag zur Reinigung von Zuckerfabriksabwasser	vergriffen
26	Gutknecht, D.: Methoden der hydrologischen Kurzfristvorhersage	300,--
27	13. Seminar ÖWWV, Raach 1978 Wasserversorgung-Gewässerschutz	350,--
28	14. Seminar ÖWWV, Raach 1979 Industrieabwasserbehandlung-Neue Entwicklungen	400,--
29	Frischherz, H.: Probleme der Uferfiltration und Grundwasseranreicherung mit besonderer Berücksichtigung des Wiener Raumes	350,--
30	Beiträge zur Hydraulik, Gewässerkunde und Wasser- wirtschaft: o.Univ.-Prof. DDr. Werner Kresser zum 60. Geburtstag	350,--
31	Schügerl, W.: Grundwasserzuströmungsverhältnisse zu Horizontalfilterrohrbrunnen	200,--

Band Nr.		Preis öS
32	3. Hydrologisches Seminar des ÖWWV 1980 Institut für Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur	350,--
33	Kulturtechnik und Wasserwirtschaft - heute (1) (1980)	vergriffen
34	15. Seminar ÖWWV, Raach 1980 Behandlung und Beseitigung kommunaler und industrieller Schlämme	350,--
35	Usrael, G.: Faktoren, die die Inaktivierung von Viren beim Belebungsverfahren beeinflussen (1980)	250,--
36	Flögl, W.: Vergleichende Kostenuntersuchungen über das Belebungsverfahren (1980)	350,--
37	Ruider, E.: Ein Beitrag zur Reinigung und Geruchsfreimachung von Abwasser aus TK-Verwertungsanstalten	350,--
38	Schiller, G.: Wasserwirtschaftliche Probleme der Elektrizitätserzeugung (1981)	Restbestände
39	Kulturtechnik und Wasserwirtschaft - heute (2)	400,--
40	16. Seminar ÖWWV, Raach 1981 Wasseraufbereitung und Abwasserreinigung als zusammengehörige Techniken	350,--
41	Kurs 1: Filterbrunnen zur Erschließung von Grundwasser	400,--
42	Kirnbauer, R.: Zur Ermittlung von Bemessungshochwässern im Wasserbau	300,--
43	Institut für Wasserwirtschaft: Wissenschaftliche Arbeiten	350,--
44	Kulturtechnik und Wasserwirtschaft - heute (3)	350,--
45	Kurs 2: Verbundwirtschaft in der Wasserversorgung	400,--
46	Stalzer, W.: Gewässerschutzplanung, deren Umsetzung und Ziel- kontrolle im Einzugsgebiet des Neusiedler Sees	350,--
47	17. Seminar ÖWWV, Ottenstein 1982 Wechselwirkung zwischen Planung und Betrieb von Abwasserreinigungsanlagen. Erfahrungen und Probleme	400,--
48	Kleinwasserkraftwerke, Notwendigkeit u. Bedeutung Flußstudien: Schwarza, Kleine Ybbs, Saalach	440,--
49	Beiträge zu Wasserversorgung, Abwasserreinigung, Gewässerschutz und Abfallwirtschaft o.Univ.-Prof. Dr.-Ing. W.v.d.Emde zum 60. Geburtstag	440,--
50	Kulturtechnik und Wasserwirtschaft - heute (4)	300,--

Band Nr.		Preis ÖS
51	18. Seminar ÖWWV Ottenstein, 1983 Sicherung der Wasserversorgung in der Zukunft	vergriffen
52	ÖWWV-Kurs 3, 1983 Thermische Beeinflussung des Grundwassers	350,--
53	Fortbildungskurs des ÖWWV 1984 "Planung und Betrieb von Regenentlastungen"	vergriffen
54	19. Seminar ÖWWV, Gmunden 1984 Sonderabfall und Gewässerschutz	vergriffen
55	Naturnahes Regulierungskonzept "Pram"	360,--
56	Fortbildungskurs des ÖWWV 1985 "Blähschlammprobleme beim Belebungsverfahren"	Restbestände 300,--
57	ÖWWV-Kurs 4, 1985 Chemie in der Wassergütwirtschaft	Restbestände 400,--
58	20. Seminar ÖWWV, Ottenstein 1985 Klärschlamm - Verwertung und Ablagerung	Restbestände 400,--
59	Pelikan, B.: Wasserkraftnutzung an der Thaya	320,--
60	Seminar "Wasser - Umwelt - Raumordnung"	220,--
61	Fleckseder, H.: Gewässerschutz im Wandel der Zeit - Ziele und Maßnahmen zu ihrer Verwirklichung	300,--
62	Kroiss, H.: Anaerobe Abwasserreinigung	300,--
63	Begert, A.: Kleine Belebungsanlagen mit einem Anschlußwert bis 500 Einwohnergleichwerte	300,--
64	Fortbildungskurs der ÖWWV 1986 "Belüftungssysteme beim Belebungsverfahren"	300,--

Diese Bände sind zu beziehen von:

Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft  
Technische Universität Wien, Karlsplatz 13, A-1040 Wien

Band 1, 2, 8, 9, 17, 21, 23, 26, 30, 31, 41, 42, 52

Institut für Wassergüte und Landschaftswasserbau  
Technische Universität Wien, Karlsplatz 13, A-1040 Wien

Band 12, 28, 34, 36, 37, 47, 49, 56, 57, 58, 61, 62, 63, 64

Institut für Wasserwirtschaft, Universität Bodenkultur,  
Gregor Mendel-Straße 33, A-1180 Wien

Band 18, 19, 22, 27, 29, 32, 38, 39, 40, 43, 44, 45, 46, 48, 50,  
55, 59, 60