

E487

Bibliotheek Hoofdkantoor TNO
's-Gravenhage ^{12/8-63}

Research Institute for
Public Health Engineering T.N.O.
Publication Nr. 53

Untersuchungen über das
Belebtschlammverfahren
für die Reinigung von Abwasser

Von Dr. A. Pasveer

Sonderdruck aus dem „Gesundheits-Ingenieur“, 76. Jahrgang 1955, Heft 21/22

TNO
10717

Untersuchungen über das Belebtschlammverfahren für die Reinigung von Abwasser

Aus dem Forschungsinstitut f. Gesundheitstechnik T. N. O., Den Haag

Von Dr. A. Pasveer

Im nachstehenden werden einige theoretische und experimentelle Untersuchungen über das Belebtschlammverfahren in ihren wesentlichen Punkten wiedergegeben¹⁾. Es werden nacheinander behandelt: Die Theorie der Sauerstoffzufuhr, eine experimentelle Untersuchung über eine der Methoden der Sauerstoffzufuhr (die Bürstenwalze), eine theoretische Untersuchung über die Sauerstoffverteilung in der Belebtschlammflocke und eine experimentelle Untersuchung über den Verlauf des Belebtschlammverfahrens bei sehr intensiver Sauerstoffzufuhr.

Die Theorie der Sauerstoffzufuhr

Symbole:

- A = Oberfläche der Grenzfläche,
- A' = Oberfläche der hypothetischen Grenzfläche,
- c = Gas- (Sauerstoff-) Konzentration,
- c_G = Gaskonzentration in der Gasmasse,
- c_L = Gaskonzentration in der Flüssigkeit,
- c_p = Gaskonzentration in der monomolekularen Gasschicht an der Grenzfläche,
- c_q = Gaskonzentration in der monomolekularen Flüssigkeitsschicht an der Grenzfläche,
- c_{LS} = Gaskonzentration in der Flüssigkeit bei Sättigung,
- H = Henrysche Konstante $\frac{c_G}{c_{LS}}$
- h = Höhe der Flüssigkeitssäule, in die das Gas diffundiert,
- h = Diffusionskonstante,
- h_L = Diffusionskonstante des Gases in der Flüssigkeit,
- h_G = Diffusionskonstante des Gases in der Gasmasse,
- Q_d = diffundierte Gasmenge,
- t = Zeit,
- t' = Existenzdauer der hypothetischen Grenzfläche in Ruhe,
- V_L = Volumen der Flüssigkeit,

$$\varrho = H \sqrt{\frac{h_G}{h_L}}$$

Das Lösen von Gasen (Sauerstoff) in ruhenden Flüssigkeiten (Wasser)

Wir nehmen als Ausgangspunkt einen einfachen Fall, nämlich das Lösen eines reinen Gases G aus einer in Ruhe befindlichen Gassäule unendlicher Länge, welche Gassäule zur Zeit t = 0 mit einer Flüssigkeitssäule unendlicher Länge in Berührung gebracht wird, in der die Flüssigkeit sich ebenfalls in vollständiger Ruhe befindet und wobei für t = 0, c_L = 0.

Es läßt sich berechnen, daß im Augenblick des Zustandekommens des Kontakts die monomolekulare Wasserschicht momentan, d. h. in einem Zeitverlauf der Größenordnung von 10⁻⁷ s, gesättigt wird. Sodann beginnt sofort die Gasdiffusion aus der monomolekularen Grenzschicht nach tieferen Schichten. Die Geschwindigkeit, mit der dies geschieht, wird durch das Ficksche Gesetz gegeben. Dieses Gesetz läßt sich in seiner ursprünglichen Form schwer anwenden. Bereits 1878 hat Stefan für eine Anzahl Fälle einfachere Beziehungen aus dem Fickschen Gesetz abgeleitet (Wiener Sitz. 77 (1878), S. 371 und 79 (1879), S. 161). Einer dieser einfachen Fälle ist obenerwähntes Beispiel. In diesem Fall mit einem reinen Gas als Gasatmosphäre ist selbst dann, wenn im Gas überhaupt keine Strömung vorhanden ist, durch die hohe Geschwindigkeit der Gasmoleküle die Konzentration in der monomolekularen Gasschicht an der Grenzfläche ebenso groß wie in der übrigen Gasmasse. Nach Stefan gilt dann

$$Q_d = 2 A (c_q - c_L) \sqrt{\frac{kt}{\pi}} \dots \dots \dots (1)$$

Hieraus läßt sich erkennen, daß die diffundierte Gasmenge der Quadratwurzel der Zeit proportional ist. Die Geschwindigkeit des Diffusionsvorganges ist im Augenblick der Bildung der Grenzfläche Gas — Flüssigkeit am größten und nimmt danach mit der Zeit schnell ab (Bild 1).

Ersetzen wir nun das Gas G durch die Gasmischung G + F, wovon F sich in der Flüssigkeit nicht löst, so wird nun wieder im Augenblick des Zustandekommens des Kontakts Gas — Flüssigkeit die monomolekulare Flüssigkeitsschicht mit dem Gas G gesättigt, bis zu einem Werte, der dem Partialdruck

des Gases G entspricht. Auch jetzt beginnt sofort die Diffusion nach tieferen Schichten. Wir dürfen jedoch in diesem Fall nicht ohne weiteres annehmen, daß die Gaskonzentration in der monomolekularen Gasschicht an der Grenzfläche der Konzentration in der Gasmasse gleich bleibt; denn jetzt müssen die aus dieser Schicht in die Flüssigkeit diffundierten Gasmoleküle durch Diffusion von der Gasmenge aus ersetzt werden. Es kann berechnet werden, daß in dem theoretischen Fall, daß die Diffusion in Säulen unendlicher Länge stattfindet, die Konzentration des diffundierenden Gases in den monomolekularen Gas- und Flüssigkeitsschichten konstant ist und durch die Ausdrücke

$$c_p = \frac{\varrho}{\varrho + 1} c_G \dots \dots (2a) \quad \text{und} \quad c_q = \frac{\varrho}{\varrho + 1} c_{LS} \dots \dots (2b)$$

wiedergegeben wird. Für die verschiedenen Gase wird der

Wert von $\varrho = H \sqrt{\frac{h_G}{h_L}}$ in erster Linie durch die Henrysche

Konstante bestimmt. Im Fall eines schlecht löslichen Gases hat H und daher auch ϱ einen hohen Wert, wodurch der

Wert von $\frac{\varrho}{\varrho + 1}$ sich 1 nähert; $\sqrt{\frac{h_G}{h_L}}$ hat stets einen hohen

Wert. Im Fall eines schlecht löslichen Gases wird c_p nur wenig von c_q differieren.

Bei einem gut löslichen Gas ist der Wert von H klein und

weicht der Wert von $\frac{\varrho}{\varrho + 1}$ erheblich von 1 ab. In diesem

Fall besteht also ein erheblicher Unterschied zwischen c_p und c_q und daher auch zwischen c_q und c_{LS}.

Das Vorhergehende ist für die Diffusion eines Gases in eine Flüssigkeit abgeleitet worden, wenn beide sich in Ruhe befinden und die Länge beider Säulen unendlich ist. Es ist von besonderem Interesse, nachzuprüfen, inwieweit die Stefanschen Formeln und die daraus abgeleiteten Schlüsse für diejenigen Fälle gelten, in denen die Säulenlänge endlich ist; Stefan hat dies eingehend untersucht. Es erweist sich, daß Gl. (1) keine größere Abweichung als 1 vH ergibt, wenn die

Bedingung $\frac{\pi^2 kt}{h^2} < 3$ erfüllt ist und keine größere Abweichung

als 2 vH, solange dieser Wert < 4 ist. In den Tabellen 1 und 2 sind für den Fall der Diffusion von Sauerstoff in Wasser einige Daten zusammengestellt.

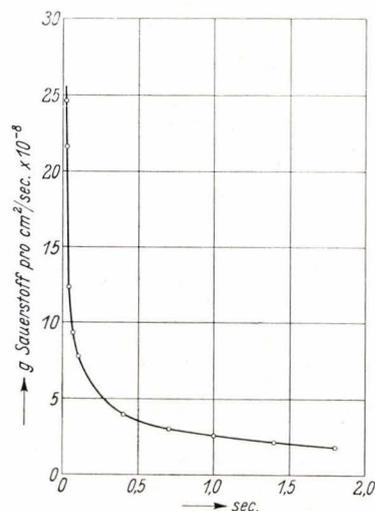


Bild 1. Geschwindigkeit der Sauerstoffaufnahme in Wasser ohne jede Bewegung bei 10°C.

¹⁾ Publikation Nr. 53 des Forschungsinstituts.

Tabelle 1: Wassertiefe und Maximum-Diffusionszeit für Gültigkeit der Stefanschen Formel

Wassertiefe (cm)	Maximum Diffusionszeit für Divergenz < 2 vH
0,01	2,7 Sek.
0,05	68 Sek.
0,1	4,5 Min.
0,5	110 Min.
1	7,5 St.
5	8 Tage
10	30 Tage

Tabelle 2: Diffusionszeit und Minimum-Wassertiefe für Gültigkeit der Stefanschen Formel

Diffusionszeit (Sek.)	Minimum-Wassertiefe für Divergenz < 2 vH
0,01	0,0006
0,1	0,002
0,5	0,004
1	0,006
10	0,02
100	0,06
300	0,1
600	0,15

Das Lösen von Gasen in bewegten Flüssigkeiten Grundsätzlich geschieht beim Lösen von Gasen in Flüssigkeiten, die sich in Bewegung befinden, genau dasselbe wie bei Gasen im Ruhezustand. Der Unterschied ist, daß, abhängig von der Intensität des Mischens, die Oberflächenschicht nach längerer oder kürzerer Zeit in die übrige Wassermenge aufgenommen wird, wo der Sauerstoff sich (auch durch Diffusion und durch Mischen) weiter verbreiten kann. Es kommen fortwährend neue Schichten an die Oberfläche. Es ist auch möglich, daß die Oberflächenschicht zwar längerer oder kürzerer Zeit dieselbe bleibt, daß jedoch die unmittelbar unter der Oberfläche befindlichen Schichten fortwährend durch andere Schichten ersetzt werden.

Der Konzentrationsabfall, der bei Wasser im Ruhezustand ($t = 0 \quad c_L = 0$) ausschließlich durch die Zeit und den Diffusionskoeffizienten bestimmt wird, wie in Bild 2 dargestellt, wird nun durch das Mischen gestört.

Diese Störung des Konzentrationsabfalls durch Turbulenz kann man sich durch einen anderen Zustand ersetzt denken, bei dem man sich die Grenzfläche als im Ruhezustand befindlich vorstellt, wobei sie jeweils plötzlich durch eine neue, in Ruhe befindliche Grenzfläche derselben Größe ersetzt wird. Außerdem muß man dabei annehmen, daß die Grenzschichten unter der verlorengegangenen Oberfläche auch momentan mit der übrigen Flüssigkeitsmenge gemischt werden.

In der Existenzdauer der hypothetischen Grenzfläche in Ruhe t' diffundiert:

$$Q_d = 2 A' (c_{LS} - c_L) \sqrt{\frac{kt'}{\pi}} \dots \dots \dots (1a)$$

woraus sich ableiten läßt:

$$\frac{dc}{dt} = 2 n \frac{A'}{V_L} \sqrt{t'} (c_{LS} - c_L) \sqrt{\frac{k}{\pi}} \dots \dots \dots (3)$$

Durch Integration über die Zeit $t_1 - t_0$, wobei c_L sich von c_0 nach c_1 ändert, finden wir:

$$2 n \frac{A'}{V_L} \sqrt{\frac{kt'}{\pi}} = \frac{1}{t_1 - t_0} \ln \frac{c_{LS} - c_0}{c_{LS} - c_1} \dots \dots \dots (4)$$

Für ein schlecht lösliches Gas wie Sauerstoff in Wasser, wobei $c_q = c_{LS}$, kann also der Wert von $n \frac{A'}{V_L} \sqrt{t'} = \frac{A'}{V_L} \frac{1}{\sqrt{t'}}$ experimentell bestimmt werden.

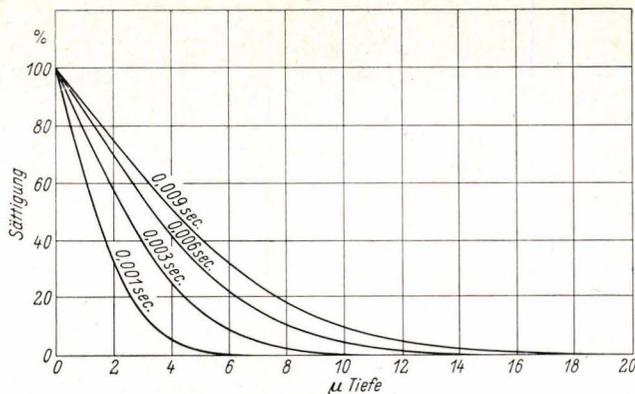


Bild 2. Der Konzentrationsabfall vom Sauerstoff in der Oberflächenschicht nach sehr kurzen Diffusionszeiten.

Dieser Ausdruck ist ein Maß für die Größe der Grenzfläche je Volumeneinheit Flüssigkeit und für den Grad der Erneuerung dieser Grenzfläche. Je stärker die Turbulenz, je kleiner t' , desto größer der Wert.

Hieraus ergibt sich weiter, daß bei in Bewegung befindlichem Wasser die Geschwindigkeit der Sauerstoffzufuhr nie theoretisch berechnet werden kann. In jedem einzelnen Fall ist eine experimentelle Bestimmung nötig.

Es hat sich im Vorhergehenden erwiesen, daß die Sauerstoffmenge, die sich im Wasser löst, proportional der Quadratwurzel der Zeit ist. Dieser Tatsache, obschon bekannt, wird meistens nicht die gebührende Aufmerksamkeit geschenkt. Zum richtigen Verständnis des Diffusionsvorgangs ist sie jedoch unentbehrlich. Hieraus läßt sich schließen, daß die Diffusion langsam vor sich geht, wenn die Zeit in Stunden und Tagen gerechnet wird, daß sie jedoch ein schneller Vorgang ist, wenn man mit Sekundenbruchteilen rechnet.

Die Geschwindigkeit der Sauerstoffdiffusion in Wasser ist ein Maximum im Augenblick der Bildung der Grenzfläche Wasser — Luft. Diese Geschwindigkeit wird mit der Zeit sehr schnell kleiner (Bild 1). Hieraus ergibt sich, daß die für die Zufuhr von Sauerstoff zu Wasser verwendete Energie für die Bildung einer neuen Grenzfläche und nicht für die Erhaltung der bereits gebildeten Grenzfläche verwendet werden muß.

Bestimmung des Sauerstoffeintragsvermögens eines Belüftungssystems

Kessener und Ribbius haben den Begriff Sauerstoff intragsvermögen geprägt¹. Unter dem Sauerstoff intragsvermögen einer Belüftungsanlage verstehen sie die Geschwindigkeit der Sauerstoffzufuhr, wenn der Sauerstoffgehalt des Wassers = 0 ist, bei einer Temperatur von 10° C und bei einem Barometerdruck von 760 mm. Das Sauerstoff intragsvermögen wird in Gramm pro Stunde je m³ Wasser ausgedrückt.

Mittels dieses Begriffes kann man durch Umrechnung, den Definitionsverhältnissen entsprechend, die Ergebnisse von Versuchen, die unter verschiedenen Verhältnissen ausgeführt worden sind, miteinander vergleichen.

Aus Gl. (3) und Gl. (4) kann für das Sauerstoffeintragsvermögen abgeleitet werden:

$$\frac{dc}{dt} = 25,9 \operatorname{tg} \alpha \sqrt{\frac{k_{10}}{k_t}} \dots \dots (5), \text{ worin}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{t_1 - t_0} \log \frac{c_{LS} - c_0}{c_{LS} - c_t}$$

Der Wert von $\sqrt{\frac{k_{10}}{k_t}}$ kann in Tabelle 3 gefunden werden.

Diese Werte wurden aus dem Wert $k_{13} = 1,98 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ und der aus Beobachtungen von Adeny ermittelten Beziehung $k_{20} = 1,45 k_{10}$, die als $k_{20} = 1,038^{10} k_{10}$ geschrieben werden kann, errechnet.

¹) Zuurstofftoeovermogen (holl.) = Sauerstoffeintragsvermögen = Oxygenation Capacity = O. C.

Tabelle 3: Änderung von $\sqrt{\frac{k_{10}}{k_t}}$ mit der Temperatur

Temp. (°C.)	$\sqrt{\frac{k_{10}}{k_t}}$	Temp. (°C)	$\sqrt{\frac{k_{10}}{k_t}}$
9	1,019	17	0,878
10	1,000	18	0,861
11	0,982	19	0,845
12	0,964	20	0,830
13	0,946	21	0,815
14	0,928	22	0,799
15	0,911	23	0,784
16	0,895	24	0,770

Für die Bestimmung des Sauerstoffeintragsvermögens braucht man daher nur $tg\alpha$ zu bestimmen. Dies kann nach der von Kessener und Ribbius angegebenen Methode erfolgen, bei der der Sauerstoff aus dem Wasser mit Ferrosulfat und Lauge gebunden wird. Dabei ist für einen Sauerstoffgehalt von ungefähr 1 mg/l Sorge zu tragen und zu kontrollieren, daß kein Ferrosulfat mehr vorhanden ist. Sodann wird belüftet, wobei an bestimmten Zeitpunkten zur Bestimmung des Sauerstoffgehalts Proben entnommen werden. Auch die aufgenommene Energiemenge wird dann gemessen. Wenn zudem die c_{Ls} bei der Prüfungstemperatur bekannt ist (vorzugsweise experimentell zu bestimmen), so verfügt man schon bereits über die Daten, mit denen das Sauerstoffeintragsvermögen in g O₂/h/m³ errechnet werden kann. Es ist dafür Sorge zu tragen, daß die Luft- und Wassertemperatur ungefähr gleich sind. Eine höhere oder niedrigere Lufttemperatur ergibt eine Temperatur in der monomolekularen Schicht, die von der Temperatur in der übrigen Wassermenge abweicht. Die bei der Berechnung einzusetzende c_{Ls} würde dann eine Unbekannte werden.

Untersuchung über die Bürstenwalze

In der angegebenen Weise wurde eine Untersuchung angestellt über die Zufuhr von Sauerstoff zu Wasser unter Benutzung einer Bürstenwalze (Bild 3). Es hat sich dabei erwiesen, daß die Zufuhr von Sauerstoff zum Wasser praktisch gänzlich in unmittelbarer Nähe der Bürste, d. h. in der dort vorhandenen, fortwährend erneuten Wasser-Luftmischung stattfindet. Dies hat zur Folge, daß bei einem kleineren Volumen des Beckens das Sauerstoff eintragsvermögen je Meter Bürste im Prinzip gleich bleibt, während die Geschwindigkeit der Sauerstoffzufuhr pro m³ Wasser proportional höher ist. Siehe Bild 4 und Tabelle 4.

Tabelle 4: Einfluß der Verkleinerung des Belüftungsbeckens auf Sauerstoffeintragsvermögen

Eintauchtiefe der Bürste (cm)	Beckeninhalt (m ³)	Energie pro 4 m Bürste kWh		Sauerstoffeintragsvermögen			Sauerstoffeintragsvermögen g/kWh
		Brutto	Netto	Pro m ³	Pro Beckeninhalt	Pro m Bürste	
8	26,5	1,525	1,260	40,6	1079	540	1708
8	26,5	1,525	1,260	40,6	1079	540	1708
8	9,25	1,500	1,235	119,3	1104	552	1781
8	3,57	1,525	1,260	316,-	1128	564	1790
8	4,00	1,575	1,310	304,-	1216	608	1856
8	4,00	1,525	1,260	295,-	1180	590	1873

Aus Tabelle 4 geht hervor, daß im kleinen Becken das Sauerstoffeintragsvermögen pro Meter Bürste 10 vH höher liegt, wodurch der Wirkungsgrad auch 10 vH besser ist. Dies muß der größeren Turbulenz im kleinen Belüftungsbecken zugeschrieben werden, wodurch eine bessere Oberflächenenergie erzielt wird.

Indem hinter der Bürste eine Haube in der Weise angebracht wird, daß das von der Bürste kommende Luft-Wassergemisch kräftig gegen diese Haube geschleudert wird, läßt sich noch eine zusätzliche Oberflächenenergie erzielen, wo-

durch das Sauerstoffeintragsvermögen in g O₂/kWh ausgedrückt um weitere 25 bis 33 vH zunimmt. Siehe Bild 5 und Tabelle 5 und 6.

Tabelle 5: Sauerstoffeintragsvermögen bei verschiedenen Eintauchtiefen der Bürste ohne Haube

Durchmesser der Bürste 42 cm. Umdrehungen 114/Min. Inhalt Belüftungsbecken 4 m³

Eintauchtiefe (cm)	Beckeninhalt (m ³)	Energie pro 4 M Bürste kWh		Sauerstoffeintragsvermögen		
		Brutto	Netto	g/h/m ³	g/h/m Bürste	g/netto kWh
5	3,73	0,900	0,603	147	274	1815
7	3,84	1,150	0,817	207	398	1951
9	3,95	1,425	1,055	261	515	1951
10	4,00	1,450	1,080	266	532	1970
11	4,06	1,550	1,163	269	546	1876
11	4,06	1,560	1,170	262	532	1819
11½	4,09	1,650	1,242	270	548	1762
12	4,12	1,740	1,314	306	632	1921
13	4,17	1,900	1,444	366	764	2116
14	4,23	2,050	1,558	391	827	2121

Tabelle 6: Sauerstoffeintragsvermögen der Bürste mit Haube — Winkel der Haube mit der Ebene 52° — Eintauchtiefe der Bürste 11 cm — Verschiedene Eintauchtiefen der Haube

Eintauchtiefe Q (cm) Bild 5	Sauerstoffeintragsvermögen			Netto Energie kWh/m Bürste
	g/h/m ³	g/h/m Bürste	g/netto kWh	
0	364	738	2460	0,300
2	356	724	2505	0,289
5	367	745	2483	0,300
8	398	809	2520	0,321



Bild 3. Eine Bürstenwalze in bisheriger Ausführung.

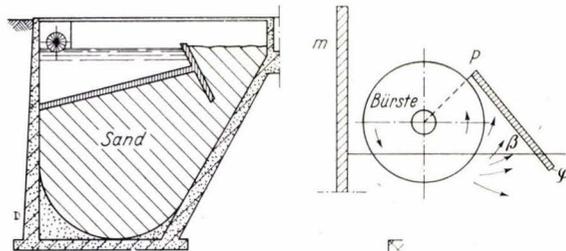


Bild 4. Das Volum des Belüftungsbeckens verkleinert von 26,5 m³ auf 4 m³.

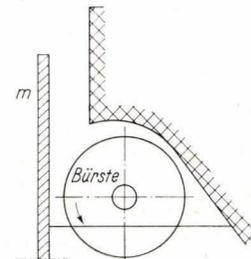


Bild 5. Haube in vorläufiger (oben) und endgültiger Ausführung.

Nebenvorteile der Haube bestehen noch darin, daß keine Tröpfchen aufgeworfen werden, wodurch Ansteckungsgefahr für die Umgebung verringert wird, während eventuelle Störungen durch Eisbildung bei Verwendung der Haube völlig vermieden werden.

Von besonderer Bedeutung ist noch, daß mit der Bürste im kleinen Becken eine Belüftungseinheit erzielt wird, in der die Geschwindigkeit der Sauerstoffzufuhr das 6- bis 8fache derjenigen beträgt, die in den heutigen praktischen Anlagen erzielt wird. Hierdurch ist es möglich, einem alten Problem der Belebtschlammreinigung, nämlich der Frage, inwieweit die Sauerstoffzufuhr den begrenzenden Faktor für das Reinigungsvermögen einer Anlage darstellt, wieder Aufmerksamkeit zu widmen.

Theoretische Erörterungen über die Zufuhr von Sauerstoff zur Flocke und dessen Bindung in der Flocke

Der Sauerstoff wird aus der Luft in das Wasser aufgenommen, im Wasser findet der Sauerstoff durch Strömung und Diffusion seinen Weg zur Flocke, durch Diffusion dringt der Sauerstoff in die Flocke ein, wo er biochemisch gebunden wird.

Wir haben daher mit vier Geschwindigkeiten zu tun:

1. der Geschwindigkeit, mit der der Sauerstoff aus der Luft dem Wasser zugeführt wird;
2. der Geschwindigkeit der Sauerstoffzufuhr aus dem Wasser zur Außenschicht der Flocke;
3. der Geschwindigkeit der Diffusion in der Flocke;
4. der Geschwindigkeit der biochemischen Bindung in der Flocke.

Es ist nun die Frage, ob im Belebtschlammverfahren, wie es zur Zeit in der Praxis angewandt wird, gerade der biochemische Oxydationsprozeß der Faktor ist, der die Reinigungsgeschwindigkeit bestimmt oder ob der begrenzende Faktor in einem der Diffusionsprozesse zu suchen ist, die die Geschwindigkeit der Sauerstoffzufuhr zur Flocke bestimmen. Um hierin einen richtigen Einblick zu gewinnen, ist es nötig, die ebenerwähnten Geschwindigkeiten in ihrem gegenseitigen Verhältnis zu studieren; wir machen dabei von folgenden Symbolen Gebrauch (soweit dieselben hier nicht angegeben sind, sind sie mit den bereits früher erwähnten Symbolen identisch):

- c = Sauerstoffkonzentration,
- c_m = im Mittelpunkt der Flocke,
- c_p = in der Grenzschicht Wasser-Flocke,
- c_v = in dem die Flocke umgebenden Wasser,
- c_x = durchschnittliche Konzentration in demjenigen Teil der Flocke, der Sauerstoff enthält,
- h = Tiefe, bis zu welcher Sauerstoff in die Flocke eindringen kann,
- K = eine Konstante,
- Q_1 = Sauerstoffmenge, die in der Flocke gebunden wird,
- r = Radius der Flocke,
- t' = hypothetische Existenzdauer in Sekunden der Grenzfläche Wasser-Flocke im Ruhezustand $\left(n = \frac{1}{t'}\right)$,
- α = Sauerstoffmenge in Gramm, die pro Sek. in 1 cm³ Flockenvolumen gebunden wird, wenn die Sauerstoffkonzentration = 1 g/cm³ ($\alpha = K\beta$),
- β = Konzentration organischen Stoffes, die konstant gedacht wird.

(Es ist hierbei zu unterscheiden, ob die ganze Flocke oder nur ein Teil derselben Sauerstoff enthält).

Die ganze Flocke enthält Sauerstoff

Die Sauerstoffmenge, die aus der Flüssigkeit in die Grenzfläche der Flocke diffundiert, ist

$$Q_d \text{ pro Flocke pro Sek.} = 4 \pi r^2 n 2 (c_v - c_p) \sqrt{\frac{kt'}{\pi}} \quad (6)$$

Für die Diffusion von der Grenzfläche in das Innere der Flocke gilt:

$$Q_d \text{ pro Flocke pro Sek.} = 4 \pi r^2 \frac{c_p - c_m}{r} k \quad (7)$$

Die Menge, die in der Flocke gebunden wird, ist

$$Q_1 \text{ pro Flocke pro Sek.} = \frac{4 \pi r^3}{3} \alpha \frac{4 c_p + c_m}{5} \quad (8)$$

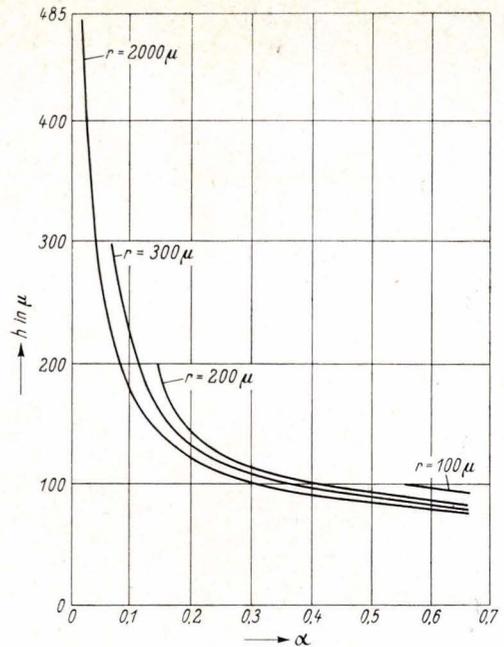


Bild 6. Beziehung zwischen Flockengröße (r), Geschwindigkeit der biochemischen Oxydation (α) und Eindringtiefe des Sauerstoffs in der Flocke (h).

worin $\frac{4 c_p + c_m}{5}$ die durchschnittliche Sauerstoffkonzentration in der Flocke darstellt.

Da $Q_d = Q_1$ (Gl. 7 = Gl. 8), ergibt sich:

$$c_m = c_p \frac{15 k - 4 \alpha r^2}{15 k + \alpha r^2} \quad (9)$$

Ebenso da Gl. 6 = Gl. 7, so ist

$$c_p = \frac{100}{1 + \frac{2,5 \alpha r}{15 k + \alpha r^2} \sqrt{\pi kt'}} \quad (10)$$

Gl. (10) zeigt, wie c_p für einen gegebenen Wert von c_v abhängt von dem Turbulenzgrad (n, t'), von der Geschwindigkeit der biochemischen Oxydation (α), von der Abmessung der Flocke (r) und von der Diffusionskonstante von Sauerstoff in Wasser (k). Die Beziehung gilt nur solange $\alpha < \frac{15k}{4 r^2}$.

Für größere Werte von α ist ein Teil der Flocke sauerstofffrei.

Nur ein Teil der Flocke enthält Sauerstoff

Nun gilt für die Diffusion von der Grenzfläche in das Innere der Flocke:

$$Q_d \text{ pro Flocke pro Sek.} = 4 \pi r^2 \frac{c_p - c_m}{h} k \quad (11)$$

$$= 4 \pi r^2 \frac{c_p}{h} k$$

Die Menge, die biochemisch gebunden wird, ist:

$$Q_1 \text{ pro Flocke pro Sek.} = \left(\frac{4}{3} \pi r^3 - \frac{4}{3} \pi (r - h)^3\right) \alpha c_x \quad (12)$$

Für bekannte Werte von r und h kann c_x in c_p ausgedrückt werden. Der Wert von α läßt sich sodann aus Gl. 11 = Gl. 12 ermitteln.

Diese Berechnung von α , die mit gewissen Werten von r und h zusammenhängt, wurde für $r = 50$ bis 2000μ und für $h = 50$ bis 500μ ausgeführt. Die auf diese Weise ermittelte Beziehung zwischen h und α ist in Bild 6 eingetragen.

Wenn nun r und α gegeben sind, kann die Tiefe h bis zum Punkt, an dem der Sauerstoff in die Flocke durchdringen kann, aus diesem Diagramm abgelesen werden. Diese Tiefe ist unabhängig von c_p .

Aus Gl. 1 = Gl. 6 kann abgeleitet werden:

$$c_p = \frac{100}{1 + \frac{\sqrt{\pi kt'}}{2h}} \text{ ausgedrückt in } \nu H c_v \quad (13)$$

Hierin kann der für h abgelesene Wert eingetragen werden.

Wir sind nun also schon so weit, daß, wenn α bekannt ist, für eine gegebene Abmessung der Flocke bei verschiedenen Turbulenzgraden berechnet werden kann, welcher Teil der Flocke Sauerstoff enthält und was die Durchschnittskonzentration in diesem Teil ist.

Außerdem können wir dann die relative Geschwindigkeit des biochemischen Oxydationsprozesses bei gegebenen α , r und t' ausrechnen. Die Geschwindigkeit des biochemischen Oxydationsprozesses bei einer Sauerstoffkonzentration in der ganzen Flocke gleich c_p wird dabei mit 100 angenommen. Was ist nun von der Größe von α bekannt?

Wir wünschen uns darüber Klarheit zu verschaffen, ob die Geschwindigkeit der Sauerstoffzufuhr ein beeinträchtigender Faktor für die Geschwindigkeit der biochemischen Oxydation sein kann. Wenn wir nun einen gewissen Wert von α finden können für die Verhältnisse, wie sie im Belüftungsbecken einer Belebtschlammanlage herrschen, können wir nachprüfen, wie die Sauerstoffverteilung in der Flocke sich bei verschiedenen Flockengrößen und verschiedenen Turbulenzzuständen verhält. Vielleicht können dann einige Schlüsse gezogen werden.

Es ist bekannt, daß am Anfang des Belüftungsbeckens bei einem Sauerstoffzufuhrvermögen von 50 g/h/m³ der Sauerstoffgehalt der Mischung Abwasser-Belebtschlamm ca. 1 bis 2 mg/l betragen kann. Hieraus läßt sich folgern, daß auch die Geschwindigkeit, mit der der Sauerstoff am Anfang des Belüftungsbeckens gebunden wird, in der Größenordnung von 40 bis 50 g/h/m³ liegt. In vielen Belüftungsbecken wird ein prozentuelles Schlammvolumen von ca. 12 νH aufrechterhalten (nach einer Absetzzeit von 1 Stunde). Der Größenordnung nach nehmen wir das Flockenvolumen einfachheitshalber mit 10 νH an.

Definitionsgemäß ist α die Anzahl Gramm Sauerstoff, die in 1 s in 1 cm³ Flockenvolumen gebunden wird bei einer Sauerstoffkonzentration von 1 g/cm³ und einer konstanten Konzentration an organischem Stoff von β ($\alpha = K\beta$). Im Belüftungsbecken ist pro m³ 100 l Flockenvolumen = 10⁵ cm³ und eine Sauerstoffkonzentration von 2 mg/l = 2 · 10⁻⁶ g/cm³. Die pro Stunde gebundene Sauerstoffmenge pro m³ Belüftungsbecken beträgt dann 10⁵ × 2 · 10⁻⁶ × 3600 × α = 50 g/h/m³, woraus sich ergibt $\alpha = 0,07$.

In Wirklichkeit wird der Wert von α bedeutend höher sein. Wenn wir für folgende Berechnung über die Sauerstoffverteilung in der Flocke α mit 0,1 annehmen, können wir dessen

sicher sein, daß alle Sauerstoffgehalte in der Flocke zu günstig (= zu hoch) dargestellt sind.

Für $\alpha = 0,1$ wurde die Sauerstoffverteilung in der Flocke, also c_p und c_m bei den kleineren Flocken und c_p und $(r-h)$ bei den größeren Flocken, für verschiedene Flockengrößen bei verschiedenen Turbulenzzuständen errechnet. Außerdem wurde das Flockenvolumen, in dem Sauerstoff enthalten ist, sowie die durchschnittlich in diesem Volumen herrschende Sauerstoffkonzentration, ausgedrückt in c_p , ermittelt. Die beiden letzten Werte bleiben bei Turbulenzwechsel ungedändert.

Aus diesen Faktoren wurde der Wert der relativen Geschwindigkeit der biochemischen Oxydation berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 zusammengestellt. Hieraus geht folgendes hervor:

1. Bei $\alpha = 0,1$ dringt der Sauerstoff nicht weiter als bis zu ca. 200 μ in die Flocke durch. Diese Eindringtiefe ist unabhängig von der Sauerstoffkonzentration in der Grenzschicht und nur wenig abhängig von der Abmessung der Flocke.
2. Bei den größeren Flocken ist das aktive Flockenvolumen prozentuell kleiner.
3. Bei den größeren Flocken ist die durchschnittliche Sauerstoffkonzentration desjenigen Flockenteiles, der Sauerstoff enthält, geringer.
4. Bei hoher Turbulenz hat die Abmessung der Flocke wenig Einfluß auf die Sauerstoffkonzentration in der Grenzfläche. Bei geringer Turbulenz ist die Sauerstoffkonzentration in der Grenzfläche bei der großen Flocke bedeutend geringer als bei der kleinen Flocke.
5. Infolge einer unzulänglichen Sauerstoffzufuhr zur Flocke wird die relative Geschwindigkeit der biochemischen Oxydation niedriger, je nachdem die Flocken größer sind und die Turbulenz geringer ist. Hierzu ist zu bemerken, daß die Flockengröße im allgemeinen von der Turbulenz abhängig sein wird (bei höherer Turbulenz eine kleinere Flocke).

Aus den vorhergehenden theoretischen Erörterungen geht somit hervor, daß eine Erhöhung der Turbulenz im Belüftungsbecken die Zufuhr des Sauerstoffes zur Flocke und damit auch die Geschwindigkeit der biochemischen Oxydation erheblich vergrößern kann. Bei starker Turbulenz ist die Abmessung der Flocke kleiner und die Sauerstoffkonzentration in der Grenzfläche Wasser — Flocke höher, so daß die Sauerstoffzufuhr zur Flocke auch groß bleibt.

Reinigungsversuche mit dem Belebtschlammverfahren bei sehr intensiver Sauerstoffzufuhr — Bürstenbelüftung im kleinen Becken

Wie bereits bemerkt, besteht ein altes (und sehr wichtiges) Problem: „Inwieweit ist die Sauerstoffzufuhr der begrenzende

Tabelle 7: Verteilung des Sauerstoffs in der Belebtschlammflocke und relative Geschwindigkeit der biochemischen Oxydation für verschiedene Flockengrößen und verschiedene Intensitäten der Turbulenz. Berechnet für den Fall $\alpha = 0,1$

Größe der Flocke r (μ)	Unabhängig von der Turbul., n			$n = 100^1)$			$n = 10$			$n = 1$			$n = 1/4$			$n = 1/10$			$n = 1/100^2)$		
	Abstand $r-h^3)$ (μ)	Volumen des Teiles $O_2 > 0$ (νH)	Mittlerer O_2 -Gehalt ⁴⁾ ($\nu H c_p$)	c_p ($\nu H c_p$)	c_m ($\nu H c_p$)	Relative Geschwindigkeit der Biochem. OX.	c_p ($\nu H c_p$)	c_m ($\nu H c_p$)	Relative Geschwindigkeit der Biochem. OX.	c_p ($\nu H c_p$)	c_m ($\nu H c_p$)	Relative Geschwindigkeit der Biochem. OX.	c_p ($\nu H c_p$)	c_m ($\nu H c_p$)	Relative Geschwindigkeit der Biochem. OX.	c_p ($\nu H c_p$)	c_m ($\nu H c_p$)	Relative Geschwindigkeit der Biochem. OX.	c_p ($\nu H c_p$)	c_m ($\nu H c_p$)	Relative Geschwindigkeit der Biochem. OX.
10	—	100	99,8	99,9	99,7	99,8	99,6	99,6	99,2	99,0	98,5	98,3	98,3	97,7	97,4	97,4	92,9	92,7	92,0	92,0	92,0
50	—	100	99,2	99,6	95,4	98,8	98,8	94,7	98,0	96,4	92,4	95,6	93,0	89,1	92,2	89,0	85,3	88,3	72,6	69,6	72,0
100	—	100	95,7	99,3	78,1	95,0	97,8	77,0	93,6	93,2	73,3	89,2	87,3	68,7	83,5	81,3	64,0	77,8	57,8	45,5	55,3
200	—	100	84,9	98,8	24,2	83,9	96,1	23,5	81,6	88,5	21,7	75,1	79,4	19,5	67,4	71,0	17,4	60,3	43,6	10,7	37,0
300	90	97,3	71,4	98,4	—	68,4	95,1	—	66,1	86,0	—	59,7	75,4	—	52,4	66,0	—	45,9	38,0	—	27,1
400	200	87,5	65,0	98,3	—	55,9	94,9	—	54,0	85,4	—	48,6	74,4	—	42,3	64,9	—	36,9	36,8	—	20,9
500	310	76,2	61,0	98,2	—	45,6	94,6	—	44,0	84,7	—	39,4	73,5	—	34,2	63,7	—	29,6	35,6	—	16,5
1000	820	44,9	54,4	98,1	—	24,0	94,3	—	23,0	84,0	—	20,5	72,4	—	17,7	62,4	—	15,2	34,4	—	8,4
2000	1820	24,6	52,2	98,1	—	12,6	94,3	—	12,1	84,0	—	10,8	72,4	—	9,3	62,4	—	8,0	34,4	—	4,4

¹⁾ Starke Turbulenz. — ²⁾ Sehr leichte Turbulenz. — ³⁾ Wo Sauerstoffgehalt = 0. — ⁴⁾ Im Volumen wo Sauerstoffgehalt > 0

Faktor für das Reinigungsvermögen einer Abwasserreinigungsanlage?“ Wenn es in wirtschaftlicher Weise möglich wäre, die Sauerstoffzufuhr in einer Belüftungsanlage zu verdoppeln oder zu vervielfachen und es sich erweisen würde, daß die Reinigungskapazität der Anlage sich im gleichen Verhältnis erhöhen läßt, würde ein viel kleineres Volumen des Belüftungsbeckens hinreichend sein und würden sich beträchtliche Ersparnisse an Baukosten erzielen lassen.

Wie vorstehend dargetan, ist die Geschwindigkeit der Sauerstoffzufuhr (in g/h/m³) in einem kleinen Becken mit einer Bürstenwalze 6 bis 8 mal höher als in den bisher in der Praxis verwendeten Becken. Die Turbulenz in diesem kleinen Becken ist ebenfalls viel höher als in den großen Becken. In diesem kleinen Becken sind daher die Bedingungen erfüllt, bei denen die Sauerstoffzufuhr zur Flocke viel schneller erfolgen kann als normalerweise der Fall ist. Es ist nun zu erwarten, daß das Reinigungsvermögen in diesem kleinen Becken pro Volumeneinheit ausgedrückt daher auch größer sein wird als in den großen Becken.

Von allen theoretischen Überlegungen abgesehen, kann man noch folgendes sagen: In der heutigen Praxis der Belebtschlammreinigung werden gute Resultate erzielt in einem Belüftungsbecken mit einem Sauerstoffeintragsvermögen von 50 g/h/m³ und 12 vH Flockenvolumen (nach einer Absetzzeit von 1 Stunde gemessen). Man darf wohl erwarten, daß in einem Becken mit einem Sauerstoffeintragsvermögen von 300 g/h/m³ und 72 vH Flockenvolumen die sechsfache Menge an organischem Stoffe pro m³ oxydiert werden kann. Diese einfache These erscheint theoretisch unangreifbar.

Die Versuchsanlage

Die Versuche wurden in einer kleinen Reinigungsanlage nach dem Belebtschlammverfahren mit Bürstenbelüftung durchgeführt. Die Anlage, die das von einem Sanatorium herkommende Abwasser reinigt, umfaßt einen Imhofftank, ein Belüftungsbecken, ein Nachklärbecken und einen Schlammfaulbehälter. Das Belüftungsbecken, das einen Inhalt von 8 m³ hat, ist mit einer 4 m langen Bürste ausgestattet. Die Bürste hat einen Durchmesser von 42 cm und macht 114 Umdrehungen pro Minute. Hinter der Bürste ist wie früher beschrieben eine Haube angebracht. In dieser Anlage wurde eine Reihe von Reinigungsversuchen durchgeführt, von denen die wichtigsten hier beschrieben werden.

1. Versuch: Anfang Oktober 1948 wurde die Anlage in Betrieb gesetzt, wobei das ganze vom Sanatorium herkommende Abwasser gleich durch die Anlage geleitet wurde. Dabei mußte die Flocke restlos in der Anlage selber gebildet werden. Die Verhältnisse wurden wie folgt gewählt. Die Eintauchtiefe der Bürste betrug 7 bis 8 cm. Die Geschwindigkeit

der Zurückführung des Rücklaufschlammes betrug 24 m³/Stunde. Die Belastung betrug 140 m³ Abwasser je 24 h, mit einem durchschnittlichen BSB₅²⁰ (biochemischen Sauerstoffbedarf) von 274 g/m³, d. h. im ganzen 38.360 g BSB₅²⁰ je 24 h, was 4800 g BSB₅²⁰ je 24 h pro m³ Belüftungsbecken entspricht. Dies ist eine 6- bis 8 mal so hohe Belastung, wie sie normalerweise in der Praxis angewendet wird. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 gesammelt. Wie daraus ersichtlich, sind für diesen ersten Versuch die Resultate nicht schlecht zu nennen. Bei nachträglicher Überlegung gab es zwei Faktoren, die einen ungünstigen Einfluß ausübten.

Der erste dieser Faktoren war, daß die Eintauchtiefe der Bürste bestimmt zu gering war. Anfangs rechneten wir mit einer Belastung von 800 Einwohner-Gleichwerten, während es sich in Wirklichkeit erwies, daß diese Belastung 1100 Einwohner-Gleichwerte betrug.

Infolgedessen war der Schlamm dunkel, beinahe schwarz, während bei späteren Versuchen bei reichlicherer Sauerstoffzufuhr die Flocke eine schöne braune Farbe hatte.

Ein zweiter ungünstiger Umstand bei diesem Versuch war, daß eine zu große Schlammmenge in der Anlage gehalten wurde.

Infolgedessen bildete sich im Nachklärbecken eine Schlammdecke, durch welche hindurch das gereinigte Wasser abgeführt wurde. Hierdurch wurde dem gereinigten Wasser Sauerstoff entzogen und wurde die Zusammensetzung des Abflusses auf ungünstige Weise beeinflußt. Der Versuch wurde wegen in der Reinigungsanlage auszuführenden Arbeiten im Januar 1949 beendet.

2. Versuch: Im April wurde ein neuer Versuch in die Wege geleitet, bei dem einige m³ Schlamm aus einer benachbarten Anlage in das Belüftungsbecken gebracht wurde. Im Anfang wurde nur wenig Abwasser zugeführt, welche Menge vergrößert wurde, je nachdem die Flocke sich entwickelte. Innerhalb eines Monats wurde die Belastung auf 2400 g BSB pro m³/24 h gesteigert.

Aus den in Tabelle 9 aufgeführten Ergebnissen ist ersichtlich, daß diese Belastung bequem und einwandfrei verarbeitet wird. In den beiden ersten Juniwochen betrug die Belastung ungefähr 3800 g BSB/m³. Da es zweckdienlich erachtet wurde, während geraumer Zeit eine konstante Belastung aufrechtzuerhalten, wurde der Versuch bis Ende Oktober mit einer Belastung von ca. 2400 g BSB/m³ fortgesetzt.

Im August ergaben sich infolge der zu geringen Größe des Imhofftanks beträchtliche Schwierigkeiten. Es gelangten große Mengen faulendes Schlammes aus dem Vorklärbecken mit dem vorgeklärten Wasser in das Belüftungsbecken. Nach

Tabelle 8: Ergebnisse des ersten Versuches — Belastung 4800 Gramm BSB₅²⁰ pro m³ Belüftungsbeckeninhalt pro 24 Stunden. Bürstenbelüftung im auf 8 m³ verkleinerten Belüftungsbecken mit 4 m Bürstenlänge

Datum	Gereinigtes Abwasser							Belüftungsbecken		
	pH	NH ₄ ⁺ mg/l	NO ₂ ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	KMnO ₄ mg/l	BSB ₅ ²⁰ mg/l	Meth. Blau- Probe St.	Schlammkonzentration		
								ml/l/h	mg/l	ml/g
1948										
Okt. 7	7,1	55	—	—	51	> 70	8	—	—	—
Nov. 11	7,1	54	Spur	—	30	24	< 23	—	—	—
Dez. 3	7,4	50,6	—	—	37	32	22	540	5232	103
Dez. 7	7,2	45,7	—	—	35	27	< 22	—	—	—
Dez. 17	7,9	44,8	—	—	36	37	18	—	—	—
Dez. 29	7,6	45,7	Spur	—	47	35	3,5	860	5764	149
1949										
Jan. 4	7,8	82,9	—	—	—	108 ¹⁾	6	980	7240	135
Jan. 10	7,8	62,6	Spur	—	32	50	< 21	970	9400	103
Jan. 13	7,8	57,1	Spur	—	32	19	54	910	11080	82
Jan. 15	7,6	63,5	Spur	—	30	16	< 18	910	7188	127
Mittelwert ²⁾	7,58	56,3	—	—	35	39	—	—	—	—

¹⁾ nach einer Betriebsstörung

²⁾ Mittelwerte vom 11. Nov. 1948 bis zum 15. Jan. 1949.

Tabelle 9: Ergebnisse des Zweiten Versuches. Bürstenbelüftung im auf 8 m³ verkleinerten Belüftungsbecken mit 4 m Bürstenlänge

Datum (1949)	Belastung		Eintauch- tiefe der Bürste(cm)		Rückfuhr- Schlamm (m ³ /h)	Belüftungsbecken				Gereinigtes Abwasser								
	Abwas- ser(m ³ / 24 h)	BSB ₅ (g/m ³ / 24 h)	1er Teil	2er Teil		Temp. (°C)	Schlamm- gehalt		Index ml/g	Asch.- gehalt (vH)	pH	NH ₄ ⁺ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	KMnO ₄ 10 Mm. (mg/l)	BSB ₅ mg/l	Meth.- Blau- Probe (h)	Aussehen
							(ml/l/h)	(g/l)										
Apr. 13	10	340	3	3	—	13	134 ¹⁾	1,262	106	17,6	—	—	—	—	—	—	—	
Apr. 20	15	510	—	—	8	12	250	1,800	139	16,1	7,8	33,3	1,3	21,1	20	9	> 96	Klar
Apr. 26	20	680	—	—	8	—	350	2,346	149	14,5	7,7	36,9	1,5	8,9	23	19	> 96	Klar
Apr. 27	—	—	—	—	8	—	375	2,674	140	13,6	7,7	41,0	1,2	15,0	27	17	> 96	Klar
Mai 3	30	1025	6	6	8	13	580	3,416	170	14,6	7,4	35,7	4,5	20,0	27	21	> 96	Klar
Mai 4	—	—	—	—	8	—	550	3,488	158	18,3	—	—	—	—	—	—	—	—
Mai 6	35	1200	—	—	8	13	670	3,520	190	15,2	7,8	34,7	8,9	10,0	16	6	> 96	Klar
Mai 10	45	1550	—	—	8	14	760	5,344	142	13,3	7,6	37,1	5,6	—	22	10	> 96	Klar
Mai 12	70	2400	7	7	8	14	880	5,332	165	13,8	7,5	34,4	2,8	—	24	12	> 96	Klar
Mai 13	—	—	—	—	8	14	750	5,640	133	13,2	7,0	34,4	2,6	—	25	15	> 96	Klar
Mai 17	—	—	9	7	8	16	880	6,584	134	11,5	7,5	32,0	0,4	8,0	26	7	> 96	Klar
Mai 24	—	—	—	—	8	16	935	7,664	122	13,1	7,1	26,4	1,1	—	29	32	< 71	Klar ²⁾
Mai 25	—	—	—	—	24	16	—	—	—	—	7,5	26,4	1,0	—	23	34	< 71	Klar ²⁾
Mai 31	110	3750	—	—	24	16	930	7,718	120	—	7,2	21,6	0,8	—	23	43	> 96	Etw.Opal ³⁾
Juni 6	—	—	11	9	24	—	750	7,472	104	10,7	—	—	—	—	—	—	—	—
Juni 9	—	—	—	—	24	17	900	6,784	133	12,1	7,4	30,6	0,9	—	34	19	< 43	Etw.Opal.
Juni 16	70	2400	10	8	24	—	—	—	—	—	7,3	35,1	1,5	Spur	23	13	> 96	Klar ³⁾
Juni 24	—	—	—	—	24	—	730	6,348	115	13,5	7,4	16,9	2,6	—	25	20	> 96	Klar ³⁾
Juli 1	—	—	—	—	24	—	375	1,708	220	16,2	7,2	15,9	11,8	Spur	23	11	> 96	Klar
Juli 4	—	—	8	6	24	—	460	4,834	95	13,2	7,1	22,3	2,4	—	26	10	> 96	Klar
Juli 8	—	—	5	5	24	—	700	7,128	98	11,2	7,3	19,5	2,0	—	23	13	> 96	Klar ³⁾
Juli 15	—	—	—	—	24	—	540	4,908	110	13,4	6,9	18,3	1,7	5,6	22	14	> 96	Klar ³⁾
Juli 25	—	—	—	—	24	—	600	5,816	103	—	6,6	17,4	3,1	—	25	14	> 96	Klar ³⁾
Sept. 1	—	—	—	—	24	—	700	3,678	190	12,9	7,2	24,7	0,7	—	22	23	> 96	Klar

¹⁾ Neuer Schlamm von Belebtschlammanlage bei Tilburg

²⁾ Flockendecke im Nachklärbecken

³⁾ Dünne Flockendecke.

⁴⁾ Zuviel Schlamm abgeführt

⁵⁾ Gereinigtes Wasser besonders gut, kristallhell

Tabelle 10: Ergebnisse des Dritten Versuches. Bürstenbelüftung im auf 8 m³ verkleinerten Belüftungsbecken mit 4 m Bürstenlänge

Datum (1949)	Vorgeklärtes Abwasser									Gereinigtes Abwasser								
	tägliche Menge des Abwassers m ³ /24 h	Schlamm- gehalt ml/l/h	pH	Prot. NH ₄ mg/l	NH ₄ ⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	KMnO ₄ mg/l	BSB ₅ mg/l	BSB ₅ g/24 h	Einw. Gleichwert	pH	NH ₄ ⁺ mg/l	NO ₂ ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	KMnO ₄ mg/l	BSB ₅ mg/l	Meth.- Blau- Probe (h)
Okt. 19	69	0,4	7,2	8,7	50,5	56	104	235	16215	464	7,5	21,1	3,0	0	63	23	4	> 96
Okt. 20	69	—	7,1	10,1	58,8	60	120	270	18630	532	7,6	26,2	2,77	0	70	33	11	> 96
Okt. 21	68	0,5	7,2	8,3	62,4	63	122	264	17952	513	7,4	35,8	1,42	0	70	35	9	> 96
Okt. 22	53	0,1	7,2	9,2	68,9	70	128	294	15582	445	7,4	42,2	1,75	0	74	37	12	> 96
Okt. 23	54	0,1	7,3	9,2	72,5	70	130	294	15876	454	7,5	50,5	0,91	0	74	42	10	> 96
Okt. 24	59	1,5	6,8	13,8	65,3	70	152	308	18172	519	6,8	51,4	1,85	0	77	40	12	> 96
Okt. 25	74	—	6,8	10,1	56,9	56	117	214	15836	452	6,8	42,2	0,95	0	70	32	9	> 96
Okt. 26	69	—	6,9	10,1	63,2	56	136	300	20700	591	7,5	42,1	0,44	0	70	35	13	> 96
Okt. 27	87	0,4	7,1	9,6	55,9	49	135	270	23490	671	7,6	39,4	0,33	0	70	37	12	> 96
Okt. 28	70	Spur	7,0	10,1	58,6	60	123	276	19320	552	7,5	39,4	0,25	0	70	34	12	> 96
Okt. 29	66	0,2	7,1	9,2	64,1	63	136	270	17820	509	7,5	42,2	0,33	0	70	36	11	> 96
Okt. 30	70	0,7	6,9	8,2	67,8	58	132	249	17430	498	7,4	47,6	1,40	0	65	36	12	> 96
Mittel- wert	67,3	0,33	7,05	9,72	62,08	60,9	128	270	18085	517	7,38	40,0	1,28	0	70,3	35	10,6	> 96

Tabelle 11: Ergebnisse des Vierten Versuches. Bürstenbelüftung im auf 8 m³ verkleinerten Belüftungsbecken mit 4 m Bürstenlänge

Datum (1949)	Vorgeklärtes Abwasser									Gereinigtes Abwasser								
	tägliche Menge des Abwassers m ³ /24 h	Schlamm- gehalt ml/l/h	pH	Prot. NH ₄ mg/l	NH ₄ ⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	KMnO ₄ mg/l	BSB ₅ mg/l	BSB ₅ g/m ³ /24 h	Einw. Gleich- wert pro m ³	pH	NH ₄ ⁺ mg/l	NO ₂ ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	KMnO ₄ mg/l	BSB ₅ mg/l	Meth.- Blau- Probe (h)
Okt. 31	—	1,0	7,0	11,9	61,4	58,0	172	336	—	—	7,4	54,0	0,50	0	65	40	14	< 96
Nov. 1	—	Spur	7,0	—	61,4	58,0	122	258	—	—	7,4	51,3	0,20	0	40	43	27	< 66
Nov. 4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7,2	49,5	Spur	0	76	45	30	< 42
Nov. 9	—	—	6,9	10,5	61,4	80,0	122	294	—	—	7,2	53,6	Spur	0	69	53	24	< 21
Nov. 19	90 ¹⁾	—	—	—	—	—	—	—	3150 ¹⁾	90 ¹⁾	7,2	66,0	Spur	0	83	54	25	< 47
Nov. 25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7,7	57,7	0,2	0	65	46	19	54
Nov. 26	—	0,7	7,2	16,0	90,2	87,0	173	368	—	—	7,7	68,7	Spur	0	91	44	20	< 65
Nov. 27	—	Spur	7,1	13,7	102,6	87,0	171	392	—	—	7,8	77,4	Spur	0	98	65	26	< 47
Nov. 28	—	0,8	7,2	13,7	87,4	72,0	184	400	—	—	7,8	32,1	Spur	0	98	67	23	76
Nov. 29	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7,7	44,9	Spur	0	80	49	18	< 47

¹⁾ Durchschnittswert

Tabelle 12: Belebtschlamm Leistungsversuch „Klokkenberg 1951“. Bürstenbelüftung im auf 8 m³ verkleinerten Belüftungsbecken mit 4 m Bürstenlänge

Datum (1951)	Vorgeklärtes Abwasser			Belüftungsbecken				Gereinigtes Abwasser							
	tägliche Menge des Abwassers (m ³)	BSB ₅ mg/l	BSB ₂₄ g/m ³ /24 h	Schlamm- gehalt ml/l/h	Schlamm- gehalt (g/l)	Schlamm- index ml/g	Aschen- gehalt vH	pH	NO ₂ ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	KMnO ₄ mg/l	BSB ₅ mg/l	Meth.- Blau- Probe (h)	O ₂ mg/l	Temp. (°C)
Aug. 16	120	318	4770	318	2,18	146	13,2	7,7	0,16	0	36	10	> 96	0,6	—
Aug. 17	141	394	6940	312	1,78	175	16,1	7,7	0,20	0	—	11	> 96	1,6	—
Aug. 21	150	259	4860	622	2,35	265	14,2	7,8	0,10	0	29	7	> 96	0,9	25
Aug. 22	142	231	4100	594	2,12	280	10,9	7,6	0,10	0	31	12	> 96	0,9	19
Aug. 23	125	208	3250	339	1,95	174	11,3	7,4	0,20	0	32	9	> 96	1,6	20
Aug. 24	134	276	4620	110	0,94	117	8,6	7,8	0,29	0	40	16	> 96	0,9	22
Aug. 28	125	378	5910	590	1,34	438	23,2	7,7	0,00	0	36	12	> 81	0,5	18
Aug. 29	134	210	3520	522	1,97	265	13,4	7,7	0,10	0	38	6	> 96	0,6	20
Aug. 30	117	207	3030	323	1,54	209	11,2	8,0	0,20	0	31	5	> 96	1,3	24
Mittelwert	132	276	4500	414	1,80	230	13,6	7,7	0,15	0	34	10	> 94	1,0	21
Sept. 19	133	312	5190	250	1,44	174	10,8	7,6	0,56	0	27	15	> 96	1,8	16
Sept. 20	108	288	3890	240	1,55	155	10,6	7,9	0,45	0	36	18	> 96	0,9	16
Sept. 21	118	267	3940	140	1,03	136	12,1	7,6	0,53	0	32	14	> 96	1,6	15
Sept. 25	133	216	3590	290	1,60	181	12,1	7,8	0,96	0	31	8	> 96	1,8	15
Sept. 26	128	267	4270	130	1,37	95	12,0	8,0	0,95	0	58	65	> 62	1,1	16
Sept. 27	137	264	4520	230	1,47	156	17,8	7,9	0,42	0	34	17	> 90	0,8	15
Sept. 28	117	273	3990	200	1,24	162	13,9	8,0	0,45	0	31	17	> 96	1,6	16
Mittelwert	125	270	4200	211	1,39	151	12,8	7,8	0,57	0	36	22	> 90	1,4	16

ein paar Wochen war die Qualität des belebten Schlammes erheblich verringert. Die Zusammensetzung des Abflusses blieb zwar gut, die Flocke enthielt jedoch Fäden und wies eine schlechte Indexziffer auf.

3. Versuch: Mit dieser Flocke, die keine optimalen Eigenschaften aufwies, ist noch ein Versuch durchgeführt worden, bei dem möglichst genau bestimmt wurde:

1. die durchschnittliche Zusammensetzung des Vorklärwassers, das in das Belüftungsbecken geleitet wurde;
2. die durchschnittliche Zusammensetzung des Abflusses;
3. die gereinigte Abwassermenge.

Die Resultate sind in Tabelle 10 zusammengestellt. Wie ersichtlich, wird eine Belastung von 2350 g BSB/24 h/m³ völlig gereinigt. Das Abflussswasser genügt der Methylenblauprobe, auch ist der durchschnittliche BSB nicht höher als 11 mg/l. Die Eintauchtiefe betrug bei diesem Versuch 6 cm, was einem Sauerstoffeintragsvermögen von ca. 200 g/h/m³ entspricht. Der Energieverbrauch war 0,45 kW pro Stunde, was 0,87 W pro Einwohner-Gleichwert entspricht (0,62 kWh pro 1000 g BSB-Abbau).

4. Versuch: Bei diesem Versuch wurde die Belastung bis zu 3150 g BSB/24 h/m³ erhöht. Das Abflussswasser genügt der Methylenblauprobe nicht. Wohl wurde noch 90 bis 92 vH des BSB im vorgeklärten Wasser entfernt. Siehe Tabelle 11.

5. Versuch: Im Jahre 1951 wurde vom staatlichen Institut für Abwasserreinigung noch ein Versuch durchgeführt, bei dem mit einer Belastung von 4200 g BSB/m³/24 h gearbeitet wurde. Bei diesem Versuch wurde die Menge der Schwebstoffe im Belüftungsbecken niedriger gehalten. Die Resultate sind in Tabelle 12 zusammengestellt. Aus diesen Daten geht hervor, daß bei einer Belastung von 4200 g BSB/m³/24 h das Wasser gut gereinigt wird und seine Faulfähigkeit verloren hat. Das Sauerstoffeintragsvermögen bei 13 cm Eintauchtiefe beträgt ungefähr 360 g/h/m³. Die Rücklaufschlammmenge betrug 10,5 m³/h. Die Aufenthaltszeit des Abwassers im Belüftungsbecken war 1,5 h, wenn der Rücklaufschlamm unberücksichtigt blieb und 30 Minuten, wenn der Rücklaufschlamm mitgerechnet wurde. In den Stunden des Spitzenbetriebes waren diese Zeiten 40 bzw. 22 Minuten. Der Schlamm war von hellbrauner Farbe, mit einer guten mikroskopischen Zusammensetzung; körnig, ohne Fäden, mit vielen lebenden Protozoen, und wies gute Absetzbarkeit auf.

Zusammenfassung der Ergebnisse der Reinigungsversuche mit Bürstenbelüftung im kleinen Becken

Die Reinigungskapazität einer Belebtschlammanlage ist in erster Linie durch die Kapazität der Sauerstoffzufuhr bedingt (Tab. 13). Dieser Befund gibt die Möglichkeit, durch

Erhöhung der Geschwindigkeit der Sauerstoffzufuhr im Belüftungsbecken eine erhebliche Ersparnis an Baukosten zu erzielen, da das Volumen des Belüftungsbeckens dann viel kleiner sein kann. Dies ist nicht nur beim Bau neuer Anlagen, sondern auch bei Erweiterung bestehender Installationen von Bedeutung.

Ergebnisse nachher ausgeführter Laboratoriumsversuche beweisen, daß auch mit Druckluftbelüftung eine hohe Belastung pro m³ Belüftungsbecken möglich ist.

Zu bemerken ist noch, daß die Verkleinerung der Flocke durch die Bürste auch im kleinen Becken die allgemeinen Eigenschaften des Schlammes nicht beeinträchtigt. Zwischen Belüftungsbecken und Nachklärbecken koaguliert die Flocke zu Flocken normaler Größe.

Tabelle 13.

Einfluß des Sauerstoffeintragsvermögens auf Reinigungskapazität einer Belebtschlammanlage

Anlage	Sauerstoffeintrags- vermögen g/m ³ /h	Belastung g BSB ₅ /m ³ /24 h
Normaler Praxis	20—80	300—1000
Klokkenberg 1949*	200	2400
Klokkenberg 1951*	360	4200

*) Bürstenbelüftung

Tabelle 14: Vergleichung des Kraftverbrauchs im kleinen Becken mit dem Kraftverbrauch in der Praxis

Anlage	Belüftungs- intensität W/m ³ 1)		Belastung Einwohner- gleichwert/m ³	Kraftver- brauch W/Ein- wohnerl.wert	
	Netto	Brutto		Netto	Brutto
Mogden ²⁾ , 1936-47	10	20	17	0,6	1,2
Bürstenprojekt	25	30	25	1,0	1,2
Klokkenberg' 49 ³⁾	56	67	67	0,85	0,95*
Klokkenberg' 51 ³⁾	180	215	120	1,5	1,75**

1) Watt pro m³ Belüftungsbecken

2) Druckluftbelüftung

3) Bürstenbelüftung

*) Belüftung sparsam

**) Belüftung reichlich

In Tabelle 14 wird der Kraftverbrauch bei diesen Versuchen mit intensiver Sauerstoffzufuhr verglichen mit dem Bürstenprojekt des staatlichen Instituts für Abwasserreinigung und mit den Resultaten, die in der großen Installation mit Druckluft in Mogden erzielt wurden, wovon die Daten über einen langen Zeitraum vorliegen. Hierbei ist zu vermerken, daß bei den Versuchen 1949 auch getrachtet wurde, den Kraftverbrauch möglichst niedrig zu halten. Bei den Versuchen im

Jahre 1951 wurde eine reichliche Belüftung angewandt, über den Kraftbedarf müssen noch ausführlichere Daten gesammelt werden. Wir halten es für wahrscheinlich, daß Reinigung bei intensiver Belüftung ohne höheren Kraftverbrauch möglich ist.

Schlußfolgerungen

1. Da die Geschwindigkeit des Diffusionsprozesses dem Wert $\frac{1}{\sqrt{t}}$ proportional ist ($t =$ Kontaktzeit), ist die Diffusion ein außergewöhnlich schneller Vorgang, wenn mit sehr kurzen Kontaktzeiten gerechnet wird.
2. Aus Schlußfolgerung 1 ergibt sich, daß die Diffusionsgeschwindigkeit im Augenblick der Grenzflächenbildung einen Höchstwert darstellt und danach mit der Zeit rasch abnimmt (Bild 1).
3. Aus Schlußfolgerung 2 ergibt sich, daß die für Belüftung angewandte Energie für die Bildung einer neuen Grenzfläche gebraucht werden muß.
4. Bei in Bewegung befindlichem Wasser läßt sich die Geschwindigkeit des Sauerstofflösungsvorganges nie ohne Experiment ermitteln.
5. Beim Belüften mit der Bürstenwalze findet der Belüftungsvorgang in unmittelbarer Nähe der Bürste statt.
6. Bei Benutzung einer Haube, die derart hinter der Bürste angebracht ist, daß das von der Bürste kommende Luft-Wassergemisch seine Richtung ändern muß, erhöht sich die Sauerstoffmenge pro kWh um 25 bis 33 vH.
7. Theoretische Überlegungen führen zu der Erkenntnis, daß durch Erhöhung der Turbulenz die Geschwindigkeit der biochemischen Oxydation im Belüftungsbecken erheblich gesteigert werden kann.
8. Die einfache These, daß bei einer sechsmal größeren Geschwindigkeit der Sauerstoffzufuhr und einem sechsmal größeren Flockenvolumen im Belüftungsbecken auch sechsmal soviel organischer Stoff pro m^3 Belüftungsbecken sich oxydieren lassen als in der heutigen Praxis üblich ist, erscheint aus theoretischen Gründen unanfechtbar.
9. Reinigungsversuche in einer kleinen Reinigungsanlage (ca. 1000 Einwohner-Gleichwerte) haben gezeigt, daß die Reinigungskapazität der Installation in erster Linie durch die Höhe der Sauerstoffzufuhr bestimmt wird.
10. Durch Erhöhung der Geschwindigkeit der Sauerstoffzufuhr (und die damit verbundene größere Turbulenz) kann pro m^3 Belüftungsbecken 6 bis 8 mal soviel Abwasser völlig gereinigt werden als bisher für möglich gehalten wurde.