

A T V - Seminar für die Abwasserpraxis, am 17. u. 18.3.1992

8. Sauerstoffbedarf und Sauerstoffzufuhr  
bei Belebungsanlagen  
Dipl.-Ing. W. Frey

1. Einleitung

Bei der Abwasserreinigung nach dem Belebungsverfahren werden die im natürlichen Gewässer stattfindenden Selbstreinigungsvorgänge auf kleinem Raum in konzentrierter Form nachempfunden. Beim Belebtschlammverfahren benötigen die Mikroorganismen für den Abbau von Kohlenstoffverbindungen und zur Nitrifikation Sauerstoff, der durch das Belüftungssystem zugeführt werden muß.

Der BSB<sub>5</sub>-Abbau wird in der Regel auch durch erhebliche Schwankungen des Sauerstoffgehaltes im Belebungsbecken nicht verschlechtert. Anders verhält es sich bei der nun bestehenden Forderung nach weitgehender Stickstoffelimination. Einerseits wird durch Absinken des Sauerstoffgehaltes sehr rasch die Nitrifikation beeinträchtigt und andererseits wird bei Rezirkulation mit hohem Sauerstoffgehalt die Denitrifikation gestört. Die Bemessung von Belüftungseinrichtungen erfolgt in der Regel nach dem maximalen Sauerstoffbedarf. Entsprechend den Belastungsschwankungen liegt der mittlere Sauerstoffbedarf deutlich niedriger. Der Ermittlung des Sauerstoffbedarfes und der sorgfältigen Dimensionierung des Belüftungssystems kommt daher besondere Bedeutung zu. Außerdem ist eine wirksame Regelstrategie zur möglichst genauen und raschen Anpassung der Sauerstoffzufuhr an den aktuellen Sauerstoffbedarf unumgänglich.

## 2. Sauerstoffbedarf

Der Sauerstoffbedarf bei der aeroben Abwasserreinigung ergibt sich aus dem Abbau der Kohlenstoffverbindungen und der Oxidation der Stickstoffverbindungen. Übliche Bezeichnungen für den Kohlenstoffabbau sind  $OVC_R$  [ $\text{kgO}_2/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ] und für die Stickstoffverbindungen  $OVN_R$  [ $\text{kgO}_2/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ] bezogen auf das Belebungsbeckenvolumen und  $OV_C$  [ $\text{kgO}_2/\text{kgBSB}_5$ ] sowie  $OV_N$  [ $\text{kgO}_2/\text{kgBSB}_5$ ] bezogen auf die  $BSB_5$  Raumbelastung. Die Anteile sind getrennt zu ermitteln wobei aber eine Rückwirkung auf den Sauerstoffverbrauch der Kohlenstoffverbindungen durch die Forderung nach Stickstoffelimination gegeben ist.

Von entscheidender Bedeutung für die Berechnung des Sauerstoffbedarfes ist die Ermittlung der Bemessungsparameter. Wie sich zeigt (KAYSER 1991) werden selbst unter Verwendung der selben Ausgangsdaten sehr unterschiedliche Werte für die Bemessung herangezogen. Das ATV Arbeitsblatt 131 enthält detaillierte Hinweise für die Ermittlung der Bemessungsparameter. Zunächst wird der mittlere Sauerstoffbedarf berechnet und danach mit Spitzenfaktoren Zulaufspitzen der  $BSB_5$ -Fracht und der Stickstofffracht berücksichtigt.

### 2.1 Sauerstoffbedarf für den Kohlenstoffabbau

Für die Ermittlung des Sauerstoffverbrauchs wurde von v.d.EMDE (1957) nach Messungen an hochbelasteten Belebungsanlagen ( $B_{TS} > 0,5 \text{ kg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ) folgende Beziehung ermittelt:

$$OVC_R = 0,5 \cdot B_R + 0,1 \cdot TS_{BB}$$

$OVC_R$  ..... Sauerstoffverbrauch bezogen auf das Belebungsbeckenvolumen in  $\text{kg O}_2/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$

$B_R$  .....  $BSB_5$ -Raumbelastung in  $\text{kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$

$TS_{BB}$  ..... Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken in  $\text{g TS/l}$

In der Folge wurde der Faktor "0,1" durch  $0,24 \cdot x$  ersetzt, wobei  $x$  den Anteil der aktiven Biomasse am Trockensubstanzgehalt darstellt.

Danach ergibt sich folgende Formel (v.d.EMDE, 1979):

$$OVC_R = 0,5 \cdot B_R + 0,24 \cdot x \cdot TS_{BB} \cdot F$$

Danach setzt sich der Sauerstoffverbrauch  $[kgO_2/m^3 \cdot d]$  zum Abbau der Kohlenstoffverbindungen aus dem Anteil der

- endogenen Atmung  $0,24 \cdot x \cdot TS_{BB} \cdot F$
- und dem Anteil
- für die Substratatemung  $0,5 \cdot B_R$

zusammen. Darin bedeuten:

$0,24$ $[kg/kg \cdot d]$	spezifische Grundatmung aktiver Biomasse
$x$ $[-]$	aktiver Anteil der Trockensubstanz
$TS_{BB}$ $[kg/m^3]$	Trockensubstanz im Belebungsbecken
$F$ $[-]$	Temperaturfaktor $F = 1,072^{(T-15)}$
$B_R$ $[kg/m^3 \cdot d]$	BSB <sub>5</sub> -Raumbelastung

Dieser Berechnung liegt die Erfahrung (von hochbelasteten Anlagen !) zugrunde, daß bei  $15^\circ C$  die "spezifische endogene Atmung" der aktiven Biomasse  $10 \text{ g } O_2/(kg \text{ oTS} \cdot h)$  beträgt.

Diese Formel wurde in der Folge von mehreren Autoren (u.a. KAYSER, 1983) übernommen und in das ATV-Handbuch (ATV, 1985) aufgenommen. Seit etwa 10 Jahren wird nun diese Formel i.a. in Deutschland und in Österreich zur Bemessung des Sauerstoffverbrauchs herangezogen.

Im Anhang des ATV-Arbeitsblattes A 131 findet sich für die Bemessung des Sauerstoffverbrauchs der Kohlenstoffverbindungen im Prinzip die gleiche Formel, nur dargestellt in Abhängigkeit vom Schlammalter  $t_{TS}$ . Diese erhält man durch Umformung mit den Gleichungen für den Überschußschlammanfall und die aktive Biomasse (v.d.EMDE 1979, KAYSER 1971 und MATSCHE 1980):

$$OV_C = \frac{OVC_R}{B_R} = 0,5 + \frac{0,144 \cdot t_{TS} \cdot F}{1 + t_{TS} \cdot 0,08 \cdot F}$$

Dabei wird vermerkt, daß der Wert  $OV_C$  mit  $1,6 \text{ kg } O_2/kg \text{ BSB}_5$  zu begrenzen ist.

In der Literatur ist der Zusammenhang des Sauerstoffverbrauchs der Kohlenstoffverbindungen mit der CSB-Bilanz (v.d.EMDE 1979; ATV, 1985; ABELING et al., 1991) dokumentiert. Unter Gleichgewichtsbedingungen muß gelten, daß die abgebaute CSB-Fracht  $\gamma_{CSB}$  der Summe aus Sauerstoffverbrauch OVC und CSB des Überschußschlammes CSB(ÜS) entspricht:

$$\gamma_{CSB-F} = OVC-F + CSB(\text{ÜS})-F$$

Sehr anschaulich wird bei einer Gegenüberstellung verschiedener Bemessungsansätze von SVARDAL/NOWAK 1992 gezeigt, daß der mit dem ATV Arbeitsblatt 131 ermittelte Sauerstoffverbrauch der Kohlenstoffverbindungen deutlich über Resultaten einer Simulationsrechnung (IAWPRC-Modell) und damit auf "der sicheren Seite" liegt. Die Rechnung nach dem Hochschulansatz jedoch viel zu hohe, und ab einem Schlammalter von etwa 20 Tagen unrealistische, Werte liefert. Anzumerken ist noch, daß im Hochschulansatz dieser Sauerstoffverbrauch auch für die Berechnung der Denitrifikationskapazität verwendet wird was zu einer krassen Überschätzung der Denitrifikationsleistung führt.

## 2.2 Sauerstoffbedarf für die Stickstoffelimination

Die Berechnung des Sauerstoffbedarfes für die Stickstoffverbindungen ist über die Stöchiometrie einfach möglich. Eine ausführliche Zusammenfassung wird von NOWAK/SVARDAL 1990 gegeben. Die Gesamtreaktion der Nitrifikation, sie verläuft in zwei Teilschritten,



ist durch einen hohen Sauerstoffverbrauch (1 g  $NH_4$ -N benötigt 4,6 g  $O_2$ ) und durch eine hohe Säureproduktion (1 Mol  $NH_4$ -N bildet 2 Mol  $H^+$ ) gekennzeichnet.

Bei der biologischen Abwasserreinigung läuft die Denitrifikation meist nach folgender Reaktionsgleichung bis zum gas-

förmigen Stickstoff ab:



Demnach werden von dem für die Nitrifikation verbrauchten Sauerstoff 2,9 g O<sub>2</sub>/g denitrifiziertem Nitratstickstoff rückgewonnen. Außerdem wird die Hälfte der produzierten Säure wieder verbraucht, die Denitrifikation von 1 Mol NO<sub>3</sub>-N verbraucht 1 Mol H<sup>+</sup>.

Der spezifische Sauerstoffverbrauch für die Stickstoffverbindungen  $OV_N$  [kgO<sub>2</sub>/kgBSB<sub>5</sub>] errechnet sich damit zu:

$$OV_N = \frac{(4,6 \cdot \text{NO}_3\text{-N}_e + 1,7 \cdot \text{NO}_3\text{-N}_D)}{\text{BSB}_5}$$

NO<sub>3</sub>-N<sub>e</sub> [mg/l] Nitrat-Stickstoff-Konzentration Ablauf  
 NO<sub>3</sub>-N<sub>D</sub> [mg/l] denitrifizierter Nitratstickstoff  
 BSB<sub>5</sub> [mg/l] Biochemische Sauerstoffbedarf in 5 Tagen  
 Alle Angaben können auch in Fracht [kg/d] erfolgen.

### 3. Sauerstoffzufuhr

Bei der Berechnung der erforderlichen Sauerstoffzufuhr wird nach ATV A131 davon ausgegangen, daß Belastungsspitzen des Kohlenstoffes und des Stickstoffes nicht gleichzeitig auftreten. Dementsprechend sind die Lastfälle:

- Nitrifikation, keine Denitrifikation, 10°C
- Nitrifikation und Denitrifikation, 10°C
- Nitrifikation und Denitrifikation, 20°C

jeweils mit der Kohlenstoffspitze und der Stickstoffspitze durchzurechnen. Anzumerken ist, daß im praktischen Betrieb einer Belebungsanlage schon aus betrieblichen Gründen (Rückgewinn an Säurekapazität, Vermeidung von Schwimmschlamm), eine Denitrifikation anzustreben ist. Außerdem ermöglicht eine auf 10°C bemessene Belebungsanlage auch noch bei geringeren Abwassertemperaturen eine Stickstoffelimination. Obige Ausführungen sollen verdeutlichen, daß der solcherart ermittelte Sauerstoffverbrauch einen Maximalwert darstellt und der im laufen-

den Betrieb auftretende Sauerstoffbedarf deutlich niedriger liegt.

Die erforderliche spezifische Sauerstoffzufuhr  $O_B$  [kgO<sub>2</sub>/kgBSB<sub>5</sub>] (Sauerstofflast) ist entsprechend dem Sauerstoffgehalt  $C_X$  im belüfteten Beckenteil umzurechnen:

$$O_B = \frac{C_S}{C_S - C_X} \cdot (OV_C \cdot f_C + OV_N \cdot f_N)$$

$C_S$	[mg/l]	Sauerstoffkonzentration bei Sättigung
$C_X$	[mg/l]	angestrebte Sauerstoffkonzentration
$f_C$	[-]	Stoßfaktor für die Kohlenstoffbelastung
$f_N$	[-]	Stoßfaktor für die Stickstoffbelastung

Zu beachten ist, daß bei Druckbelüftung die Sättigungskonzentration entsprechen der Einblastiefe zu korrigieren ist.

Aus der berechneten Sauerstofflast erhält man, nach folgender Gleichung, den von der Lieferfirma des Belüftungssystems zu garantierenden Sauerstoffeintrag  $OC^*$  [kg/h] in Reinwasser:

$$OC^* = O_B \cdot B_{dBSB5} \cdot \frac{f_T}{24 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot f_p}$$

$B_{dBSB5}$	[kg/d]	BSB <sub>5</sub> - Fracht
$f_T$	[-]	Temperaturkorrekturfaktor
24	[h/d]	Umrechnung auf den Stundenmittelwert
$\alpha$	[-]	Sauerstoffzufuhrfaktor, Abminderungsfaktor der Sauerstoffzufuhr unter Betriebsbedingungen im Verhältnis zu Reinwasser
$\beta$	[-]	Abminderungsfaktor des Sauerstoffsättigungswertes im Belebtschlamm zufolge spezieller Abwasserinhaltsstoffe
$f_p$	[-]	Korrekturfaktor für die Ortshöhe

Die Rechnung enthält genügend Sicherheiten damit für den praktischen Gebrauch im kommunalen Bereich der Temperatureinfluß die Höhenlage und der  $\beta$ -Wert zu 1 gesetzt werden können. Damit erhält man:

$$OC^* = \frac{O_B \cdot B_{dBSB5}}{24 \cdot \alpha}$$

### 3.1 Theorie des Sauerstofftransportes

Der Sauerstofftransport aus der Gasphase in das Abwasserbelebtschlammgemisch läßt sich vereinfacht in folgende Abschnitte gliedern:

- Transport des Gasmoleküls aus der Luft an die Konzentrationsgrenzschicht
- Diffusion durch die gasseitige Konzentrationsgrenzschicht
- Durchtritt durch die Phasengrenzschicht
- Diffusion durch die flüssigkeitsseitige Konzentrationsgrenzschicht
- Transport in das Innere der Flüssigkeit bis zur Belebtschlammflocke (und in diese hinein)
- Transport durch die Zellmembran der Mikroorganismen

Zur Beschreibung der Kinetik von Teilen dieses Vorganges gibt es verschiedene theoretische Ansätze z.B. das Zweifilmmode (LEWIS und WHITMEN 1923), das Penetrationsmodel (HIGBIE 1935) oder das Oberflächenerneuerungsmodel (DANCKWERTS 1951) usw. Eine Zusammenfassung findet man bei WAGNER 1991.

### 3.2 Einfluß von Wasserinhaltsstoffen

Die Sauerstoffzufuhr von Belüftungssystemen wird heute in der Regel noch in Reinwasser mit etwa Trinkwasserqualität bestimmt. Durch Inhaltstoffe des Abwassers (Salze, Detergentien, usw.) wird der Sauerstoffeintrag verändert. Es ist üblich, die Verhältniswerte

$$\alpha = \frac{k_L a \text{ (Betriebsbedingungen)}}{k_L a \text{ (Reinwasser)}}$$

und

$$\beta = \frac{C_S \text{ (Betrieb)}}{C_S \text{ (Reinwasser)}}$$

anzugeben.

Der Abminderungsfaktor  $\beta$  für den Sauerstoffsättigungswert ist in kommunalem Abwasser von untergeordneter Bedeutung und kann für praktische Anwendungsfälle = 1 gesetzt werden.

Die feinblasige Belüftung wird besonders durch grenzflächenaktive Stoffe (Tenside aus Waschmitteln) beeinflusst. Oberflächenaktive Stoffe lagern sich an den Grenzflächen Luft/Wasser an. Der Sauerstoffdurchgang durch diese Grenzfläche wird durch die angelagerten Substanzen behindert, womit  $\alpha < 1$  wird. Ausführliche Untersuchungen zur Problematik grenzflächenaktive Stoffe/Sauerstoffzufuhr wurden von WAGNER 1991 durchgeführt.

#### 4. Belüftungssysteme

Im wesentlichen wird zwischen Druckbelüftungssystemen in verschiedenen Ausführungsformen sowie Oberflächenbelüftern in verschiedenen Bauvarianten unterschieden. Die Belüftungseinrichtung soll folgende Forderungen erfüllen:

- ausreichende Sauerstoffzufuhr um den Sauerstoffbedarf der Mikroorganismen abzudecken
- intensive Durchmischung des Abwasserschlammgemisches
- ausreichende Strömungsgeschwindigkeit im Becken um Ablagerungen zu vermeiden
- Regelbarkeit entsprechend den Belastungsverhältnissen
- hohe Betriebssicherheit (kein Verstopfen der Belüfter)
- geringer Energiebedarf für Sauerstoffzufuhr und Durchmischung
- niedrige Baukosten für das Belebungsbecken und die Belüftungseinrichtung
- Beständigkeit gegen mechanische und chemische Angriffe
- geringer Wartungsaufwand für die Belüfter

Je nach gewähltem Verfahrensprinzip ist auch die Forderung nach Abstellbarkeit des Belüftungssystems gegeben. Eventuell werden Mischaufgaben von zusätzlich angeordneten Rührwerken übernommen.

#### 4.1 Druckbelüftung

Der Sauerstoffübergang erfolgt praktisch ausschließlich durch im Wasser aufsteigende Blasen.

Es kann eine Einteilung nach der Anordnung der Belüfterelemente erfolgen. Heute werden die Belüftungselemente ausschließlich in Bodennähe angeordnet. Die Anordnung der Belüfter längs einer Beckenwand nennt man Linien oder Bandbelüftung. Wegen geringer Wirtschaftlichkeit, kommt diese Anordnung bei neuen Anlagen nicht mehr zum Einsatz, hier wird man eine Flächenbelüftung vorsehen. Je nach Verfahrensprinzip sind die Belüfter im gesamten Becken oder in Teilen, gleichmäßig über die Beckensohle verteilt.

Eine weitere Gliederungsmöglichkeit ist in der Art der Blasenentstehung und Blasengröße zu sehen. Die Blasen können durch Austritt aus feinen Poren, durch Dissipation energiereicher Treibstrahlen und durch mechanische Zerkleinerung durch stillstehende Einbauten oder bewegte Teile gebildet werden. Die mittelblasige als auch die grobblasige Belüftung sind heute wegen ihrer geringen Wirtschaftlichkeit bedeutungslos.

Daneben ist eine Einteilung nach der Art der Einbringung der Luft, d.h. ob mittels Gebläsen oder durch eine Injektorwirkung (selbstansaugend) Luft in das Belebungsbecken eingebracht wird, möglich.

Weiters kann eine Aufspaltung, in Systeme die eine Durchmischung des Beckens nur durch die eingeblasene Luft bewerkstelligen und jene die mittels eigener Aggregate eine getrennte Umwälzung erreichen, vorgenommen werden.

##### 4.1.1 Allgemeine Zusammenhänge

Die Sauerstoffzufuhr [OC in  $\text{kgO}_2/(\text{m}^3\text{Becken}\cdot\text{h})$ ] steigt in etwa proportional zur Luftmenge und proportional zur Einblastiefe. Mit einer Vergrößerung der Einblastiefe steigt auch der Sauerstofftrag [ $\text{kgO}_2/\text{kWh}$ ], die Sauerstoffausnutzung

$[gO_2/(Nm^3 \cdot m_{ET}); \%/m_{ET}]$  hingegen wird geringfügig reduziert.

Untersuchungen von PÖPEL/WAGNER 1991 haben gezeigt, daß bei einer Erhöhung der Belüfterdichte (Verhältnis abgasende Belüfteroberfläche zu Beckengrundfläche) von 20% auf 40% eine Steigerung des Sauerstoffertrages um ca. 30% zu erwarten ist. Eine weitere Anhebung der Belüfterdichte bringt jedoch nur mehr geringen Zuwachs der Wirtschaftlichkeit.

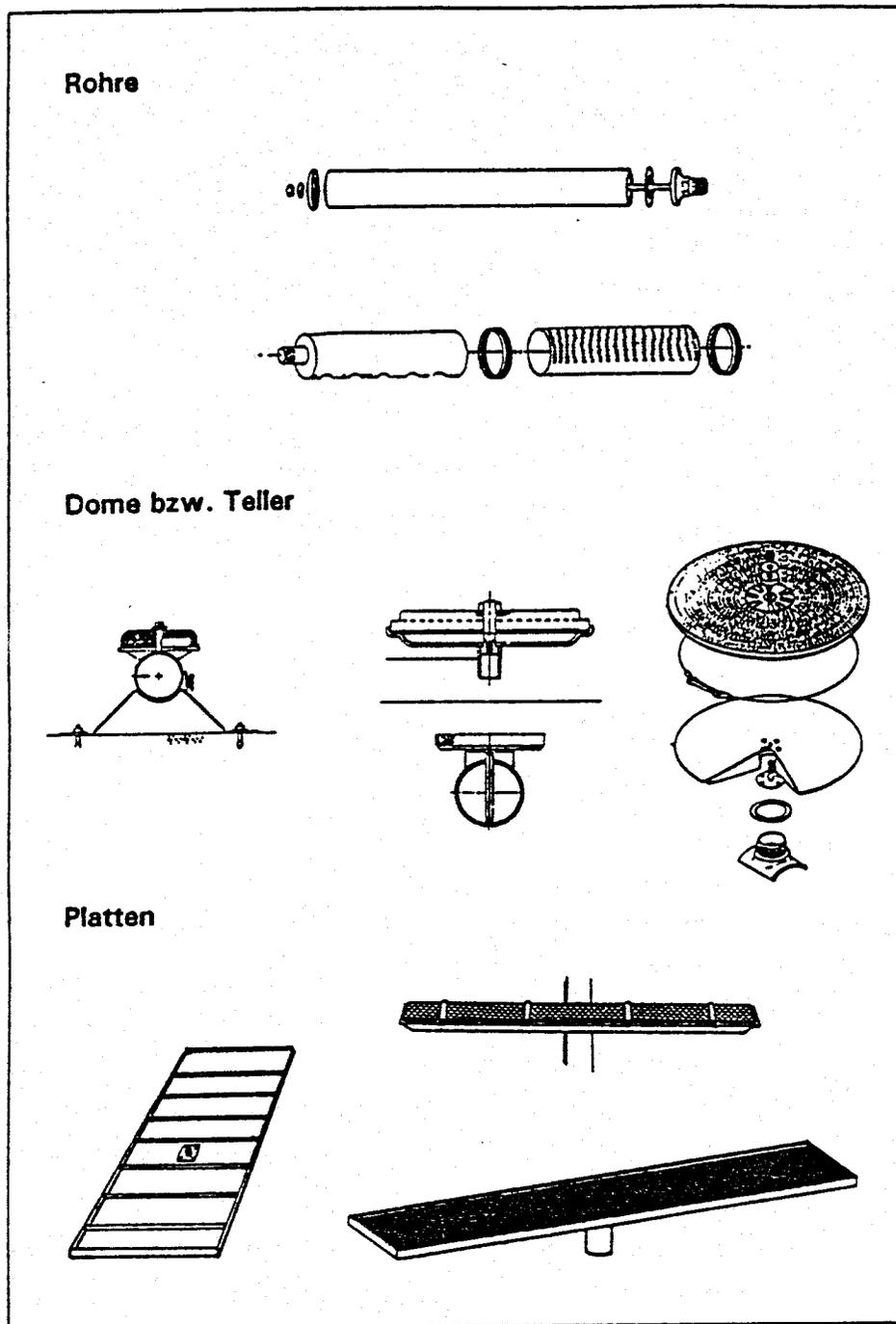
#### 4.1.2 Feinblasige Druckbelüftung

Die feinblasige Verteilung der Luft wird über an der Sohle angeordnete Rohre, Dome, Platten oder Teller erreicht. Diese Belüfterelemente sind entweder starrporöse Keramik- oder Kunststoffkörper oder entsprechend geformte Trägerkörper die mit flexiblen, gelochten oder geschlitzten, Membranen bzw. Folien überzogen sind.

Bei der feinblasigen Belüftung, mit porösen Belüfterkörpern, besteht die Gefahr, daß die feinen Poren der Belüfter verstopfen. Diese Verstopfungen können wasserseitig z.B. durch Eindringen von Schlamm aber auch luftseitig durch Verunreinigungen in der zugeführten Luft (Staub, Öl) verursacht sein. Durch die zunehmende Verlegung von Poren steigt der Austrittsdruckverlust und damit sinkt der Sauerstoffertrag. Es ist eine periodische Reinigung und eine Erneuerung der Belüfter in entsprechenden Zeitabständen notwendig.

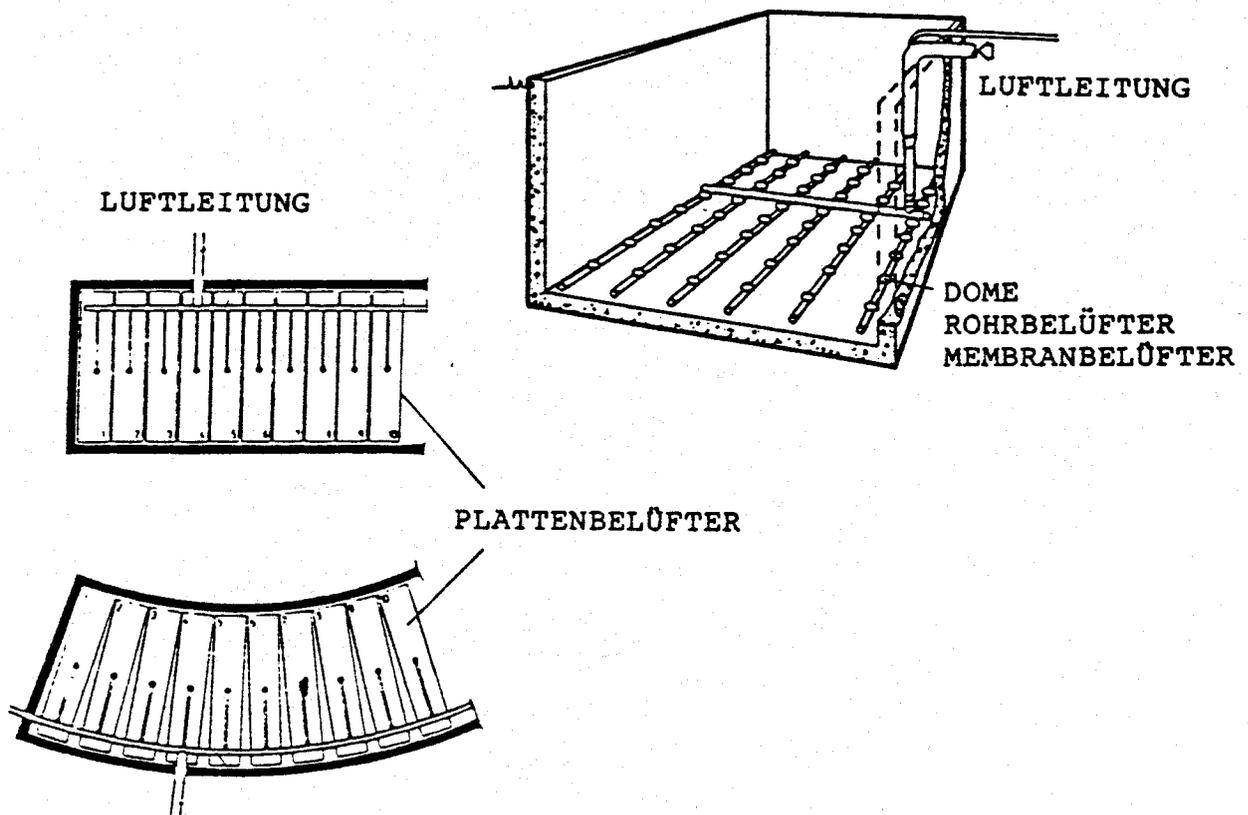
Membranbelüfter sind theoretisch verstopfungsfrei. Hier stehen Fragen nach der chemischen und mechanischen Beanspruchbarkeit im Vordergrund. Aufgrund der hohen Sauerstoffausnutzung wird mit geringen Luftmengen gearbeitet, dadurch steht wenig Mischenergie zur Verfügung und es kann zu Ablagerungen kommen. Vorsicht ist speziell bei Anlagen ohne Sandfang und Vorklärung geboten.

Abbildung 1: Bauformen (PÖPEL/WAGNER1991)



Feinblasige Druckbelüftungssysteme können in Misch- und Umlaufbecken eingesetzt werden, zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit sind Wassertiefen von 3m und mehr günstig. Wesentlich ist hier das Zusammenwirken von Beckenform und der Belüfteranordnung. Speziell bei Umlaufbecken mit nicht vollständiger Belegung der Beckensohle, aus verfahrenstechnischen Gründen (Nitrifikation, Denitrifikation), muß mit geringerer Leistung des Belüftungssystems gerechnet werden.

Abbildung 2: Einbaubeispiele



Nach eigenen Messungen und Angaben aus der Literatur (z.B. FREY 1986, PÖPEL u. WAGNER 1991) ergibt sich eine starke Streuung der Sauerstoffertragswerte. Entsprechend der Anlagen- ausbildung und Abwasserzusammensetzung ist mit  $\alpha$ -Werten zwischen 0,5 und 0,7 zu rechnen. Der typische Energieaufwand liegt bei  $5,5 \text{ Wh/Nm}^3/\text{m}_{\text{ET}}$ . Wenn große Maschinen im günstigen Wirkungsgradbereich (z.B. Turboverdichter oder Schraubenverdichter) betrieben werden sind deutlich geringere Werte möglich (zum Teil unter  $4 \text{ Wh/Nm}^3/\text{m}_{\text{ET}}$ ), andererseits wurden speziell im Teillastbetrieb und bei Plattenbelüftern mit Folien wesentlich erhöhte Energieaufnahmen ( $8 \text{ Wh/Nm}^3/\text{m}_{\text{ET}}$  und darüber!) gemessen.

#### 4.1.3 Statische Mischer

Der statische Mischer besteht aus einem Rohr mit Einbauten. Am unteren Ende des Belüfters, nahe dem Beckenboden, wird Luft

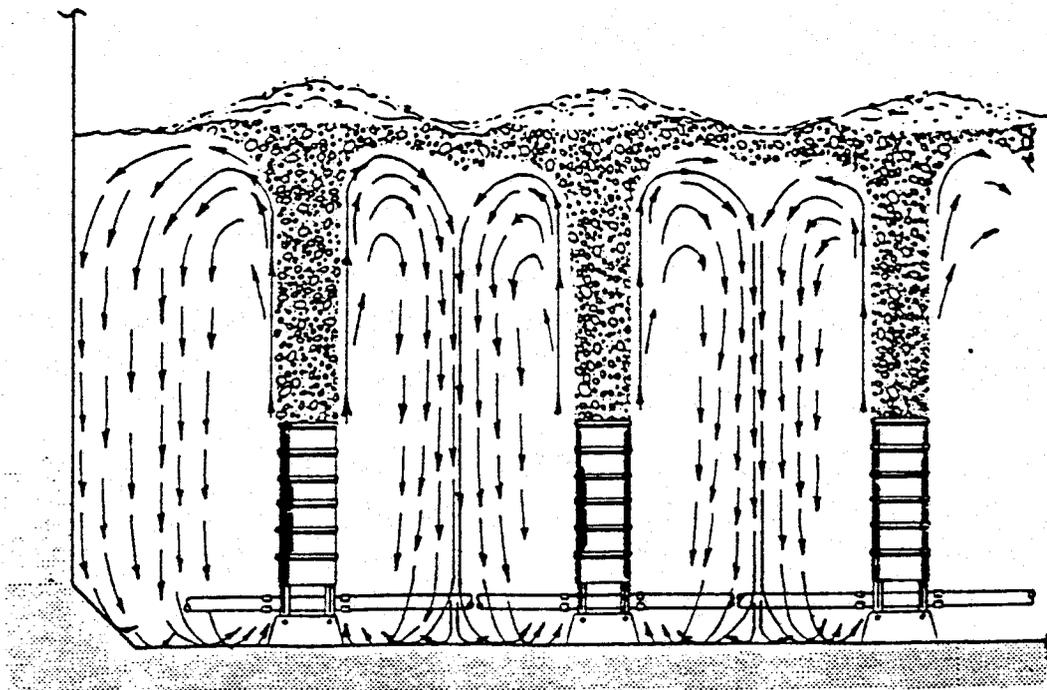
durch eine Düse eingeblasen. Im Mischrohr werden die anfänglich groben Luftblasen zerschlagen und fein verteilt. Das Mischrohr weist einen Durchmesser von ca. 0,4 m und eine Höhe von ca. 2,5 m auf. Die Belüfter werden am Beckenboden verankert.

Die Anpassung des Sauerstoffeintrages auf den Sauerstoffbedarf erfolgt über die Änderung der Luftmenge. Da jede Belüftungseinheit hinsichtlich Strömung ihren eigenen Einflußbereich erzeugt, werden an die Grundrißgestaltung des Belebungsbeckens keine besonderen Ansprüche gestellt. Die wirtschaftliche Wassertiefe liegt im Bereich über 6 Meter.

Statische Mischer arbeiten praktisch verstopfungsfrei und setzen sich auch bei vorübergehender Abstellung der Luftzufuhr nicht zu. Für die unter Wasser liegenden Teile ist keine Wartung erforderlich.

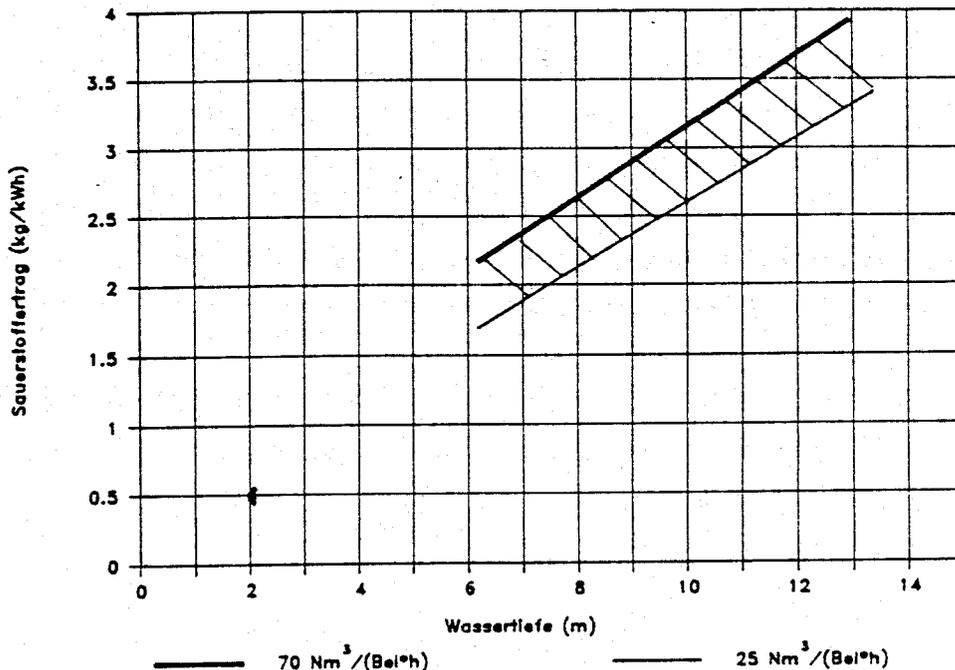
Um gesichert Ablagerungen zu vermeiden ist eine flächige Anordnung und eine Leistungsdichte größer  $20 \text{ W/m}^3$  anzustreben.

Abbildung 3: Statischer Mischer



Die Auswertung von Sauerstoffzufuhrversuchen auf 5 Großanlagen die mit Statikmischern ausgerüstet sind ergaben in Abhängigkeit der Wassertiefe Sauerstofferrträge von 2,0 bis 3,5 kg/kWh.

Abbildung 4: Sauerstofferrtrag - Wassertiefe



Eigene Messungen unter Betriebsbedingungen ergaben bei einer Luftbeaufschlagung von  $45 \text{ Nm}^3/(\text{Bel}\cdot\text{h})$  und  $9,0 \text{ m}$  Einblastiefe einen  $\alpha$ -Wert von  $0,6$ .

#### 4.1.4 Strahldüsenbelüftung

Unter dem Begriff Strahldüsenbelüfter werden alle Zweistoffdüsenbelüfter, wie Injektoren und Mischstrahldüsen zusammengefaßt, bei denen mittels eines energiereichen Flüssigkeitsstrahles, die über eine Mischdüse zugeführte Luft in feinste Blasen zerteilt wird. Die Luft kann selbsttätig angesaugt oder durch Überdruck mittels Kompressoren eingeblasen werden.

Bei den üblichen Ausführungsformen der Strahldüsenbelüfter werden die einzelnen Belüftereinheiten nahe der Beckensohle montiert. Je nach System werden durch die Strahldüsenbelüfter Blasensäulen mit vertikaler, geneigter oder horizontaler Treibstrahlrichtung erzeugt, wobei im allgemeinen eine

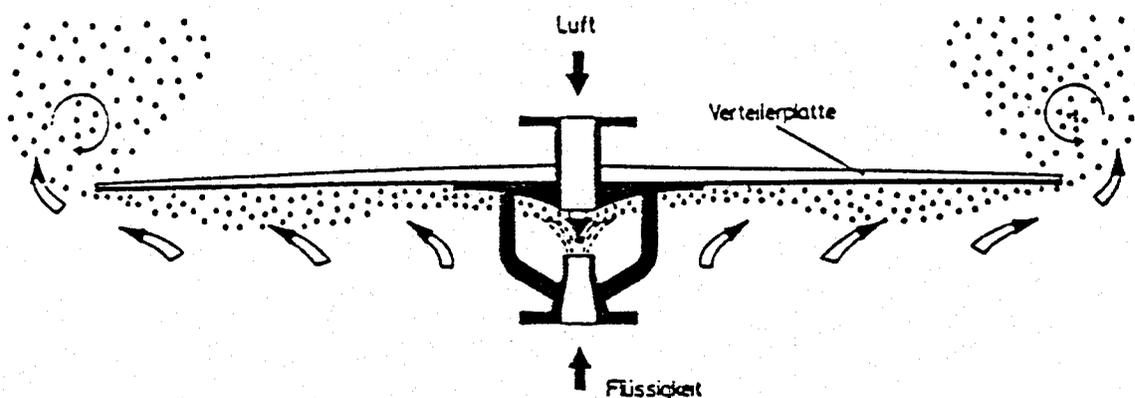
Flächenbelüftung angestrebt wird. Bei intensivem horizontalem Treibstrahl stellt sich in Rundbecken oder Umlaufbecken gleichzeitig eine Umlaufströmung ein.

Die Sauerstoffzufuhr der Injektorbelüftung hängt in erster Linie vom Verhältnis Luft zu Treibwasser und von der Beckentiefe ab. Mit zunehmendem Luft- zu Wasserverhältnis sinkt der Sauerstoffausnutzungsgrad stark, da die über den Treibstrahl zur Verfügung gestellte Energie nicht mehr ausreicht, die Luft fein zu dispergieren.

Um einen sicheren Betrieb der Injektorbelüftung zu gewährleisten, sollen die Injektor Düsen möglichst unempfindlich gegen Verstopfung sein. Aus diesem Grund sind relativ große Düsendurchtrittsöffnungen zu wählen und eine gut funktionierende Vorklärung vorzusehen. Im Einzelfall kann es auch notwendig sein vor den Treibwasserpumpen ein Sieb zu installieren. Auch die abrasive Wirkung von Abwasserinhaltsstoffen ist bei der Konstruktion und Werkstoffauswahl zu berücksichtigen.

#### - Radialstromdüse

Abbildung 5: Radialstromdüse



Der nach oben gerichtete Treibstrahl trifft auf einen gegenüberliegenden Leitkegel und wird zu einem Flachstrahl umgeformt. Er ist allseitig nach außen gerichtet und fließt längs der Leitplatte in radialer Richtung ab. Die von oben herangeführte Luft tritt hinter dem Leitkegel hervor und über einen

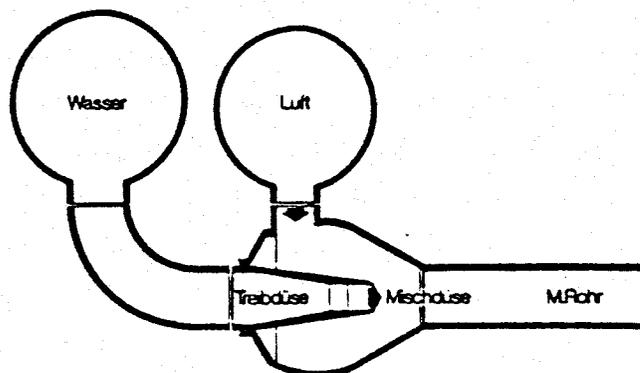
Ringspalt in den Flüssigkeitsstrom ein. Sie wird von der turbulenten Strömung mitgerissen und dabei zu kleinen Blasen dispergiert. Auf den Düsenkörper kann eine Verteilerplatte aufgesetzt werden. Um die räumliche Verteilung des Blasen-Wassergemisches zu verbessern kann ein Leitrohr angeordnet und so eine Schlaufenströmung erzeugt werden.

Das System ist in Industrieabwasserreinigungsanlagen der HÖCHST AG in sogenannten Biohochreaktoren im großtechnischen Einsatz. Die hier erzielten Sauerstoffträge liegen in der Größenordnung zwischen 2,5 und 3,0 kgO<sub>2</sub>/kWh (SELL 1985).

#### - Mischstrahldüse

Der Injektor besteht aus einem Gaseintrittsstutzen durch den Luft eintritt, der Treibdüse durch die das Treibmittel gedrückt wird, der Mischkammer in der die Gas/Flüssigdispersion entsteht und der Mischdüse durch die das Zweiphasengemisch in den Diffusor bzw. das Mischrohr gelangt. Die Luft kann, wenn das Becken nicht zu tief ist, selbständig angesaugt oder eingeblasen werden. Die maschinentechnische Installation für die Injektorbelüftung besteht aus den Injektoren, dem Gebläse, der Pumpe für das Treibwasser und den verbindenden Rohrleitungen. Das Verhältnis von Umlaufwasser zur Luft beträgt etwa 1 zu 5. Die Düsendurchmesser der Injektoren liegen im cm-Bereich.

Die Zweistoffdüsen gestatten es, den Sauerstoffeintrag und die Umwälzung getrennt zu betreiben. Dies ist speziell im Hinblick auf ein Verfahrenskonzept mit Nitrifikation und Denitrifikation von Vorteil. Wobei aber anzumerken ist, daß ein modernes Rührwerk wesentlich kostengünstiger arbeitet.

Abbildung 6: Aufbau von Zweistoffdüsen

Mischstrahlbelüftungssysteme stellen an die Beckengeometrie keine besonderen Anforderungen. Sie können sowohl in Mischbecken wie auch in Umlaufbecken eingesetzt werden. Die BAYER Injektoren werden in Vierergruppen unter  $45^\circ$  geneigt zur Beckensohle flächig angeordnet. Die VOEST-Mischstrahldüsen sind einzeln nebeneinander angeordnet ihre Ausströmöffnung ist ca.  $5^\circ$  gegen die Horizontale zur Beckensohle hin geneigt und alle Düsen zeigen in eine Richtung so daß sich eine Umlaufströmung einstellt. Durch die Verteilung der Strahldüsenbelüfter über die Beckensohle und der Wahl der Strahlrichtung ist sicherzustellen, daß durch die ausreichende Turbulenz oder Umlaufströmung Schlammablagerungen vermieden werden. Messungen von Mischstrahldüsen auf 9 Großanlagen (FREY 1991) im Leistungsbereich zwischen 20 und  $140 \text{ W/m}^3$  ergaben Sauerstofferrträge von 1,2 bis  $3,5 \text{ kg/kWh}$  wobei starke Abhängigkeiten von der Beckengeometrie und Düsenanordnung gegeben sind. An der Quantifizierung dieser Abhängigkeiten wird derzeit gearbeitet.

#### 4.1.5 Tauchbelüfter

Diese können als Sonderkonstruktion einer Injektorbelüftung ausgeführt sein. Hierbei werden die Treibwasserpumpe, eventuell ein Gebläse sowie radial vorgesezte Zweistoffdüsen zu einer Einheit zusammengefaßt. Zufolge der meist kleinen Antriebsaggregate ergibt sich bei einer Wassertiefe von 5 Metern ein Sauerstofferrtrag von etwa  $1,1$  bis  $1,4 \text{ kgO}_2/\text{kWh}$ .

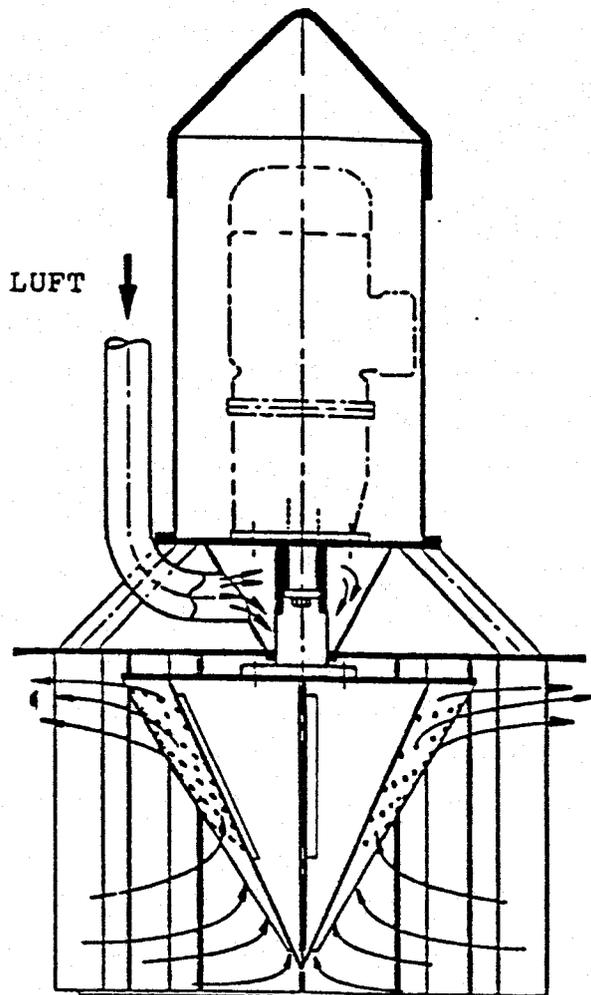
Eine zweite Gruppe von Tauchbelüftern besteht im wesentlichen aus einem Antriebsmotor, einem direkt gekuppelten Pumpenlaufrad sowie einem ringsherum angeordneten Leitkranz. Die Turbine rotiert im Zentrum des Leitkranzes und saugt dabei selbsttätig Luft durch die Ansaugleitung. Gleichzeitig strömt Wasser in das Laufrad ein, wird innig mit Luft vermischt, und das Gemisch wird radial durch den Leitkranz nach außen geschleudert. Auch hier liegen die Sauerstoffertragswerte nach Firmenangaben bei 1,0 - 1,5 kgO<sub>2</sub>/kWh.

Diese Einheiten können jederzeit in ein Becken eingesetzt und auch wieder demontiert werden.

#### 4.1.6 OKI-Turbinentauchbelüfter

Das System kommt aus Finnland, wo es ursprünglich in der Erzaufbereitung eingesetzt wurde. Es ist relativ neu auf dem Belüftungssystem-Markt. Dieser Belüfter ermöglicht, bei entsprechender Motorkonstruktion (Mischstufe, polumschaltbare Maschine), eine Trennung zwischen Belüftung und Umwälzung. Das gekapselte Aggregat wird komplett in das Belebungsbecken abgesenkt und über eine flexible Luftleitung mit Druckluft versorgt. Im Mischbetrieb wird der Kegel in eine Drehbewegung versetzt, soll zusätzlich belüftet werden so wird Druckluft durch die Hohlwelle in den Hohlkegel geleitet und tritt an der Kegeloberfläche durch Schlitze aus, wobei sie, durch auf den Kegel aufgesetzte Rippen, in kleine Blasen zerschlagen und durch die auftretende Strömung im Becken verteilt wird. Es stehen Aggregate in verschiedenen Größen zur Verfügung wobei je nach Aggregatgröße, Einblastiefe und Luftmenge, Sauerstoffeinträge zwischen 10 und 200 kgO<sub>2</sub>/h angegeben werden.

Durch die relativ großen Luftaustrittsöffnungen arbeitet das System weitgehend verstopfungsfrei. Es werden keine besonderen Anforderungen an die Beckengeometrie gestellt wobei die Beckentiefe aus Wirtschaftlichkeitsgründen 4 m nicht unterschreiten sollte.

Abbildung 7: OKI-Turbinentauchbelüfter

Eigene Messungen unter Betriebsbedingungen auf einer betrieblichen Vorreinigungsanlage der chemischen Industrie haben bei ca.  $140 \text{ W/m}^3$  einen Sauerstofftrag von  $2,5 \text{ kg/kWh}$  ergeben. Der Sauerstoffzufuhrfaktor wurde zu ca.  $0,7$  ermittelt. Das gute Ergebnis muß jedoch stets gemeinsam mit der vorhandenen Abwassersituation gesehen werden. Leider liegen zur Zeit noch keine Messungen in kommunalen Kläranlagen vor. Es stehen aber eine Reihe von Anlagen vor der Fertigstellung, so daß auch hier bald weitere Aussagen möglich sind.

#### 4.2 Oberflächenbelüfter

Bei allen Oberflächenbelüftern erfolgt der Sauerstoffeintrag durch die mechanische Einwirkung der Belüfter an der Wasser-

oberfläche. Die Oberflächenbelüfter erzeugen gleichzeitig Umwälzströmungen, wodurch der belebte Schlamm und die Schmutzstoffe des Abwassers vermischt und Schlammablagerungen verhindert werden. Es wird zwischen Belüftern mit horizontaler Achse und solchen mit vertikaler Achse unterschieden.

#### 4.2.1 Walzenbelüfter

Diese werden auch Rotoren, Stabwalzen oder Mammutrotoren genannt. Sie bestehen aus, auf einer horizontalen Welle, radial befestigten Stahl- oder Kunststoffprofilen die beim Rotieren in das Wasser einschlagen. Dadurch entsteht, vor allem hinter dem Rotor, ein stark turbulentes Luftblasen- Wassergemisch. Gleichzeitig wird eine Strömung in den Wasserkörper induziert. Bei Neuanlagen kommen ausschließlich Mammutrotoren mit einem Durchmesser von einem Meter und einer Länge von maximal 9 Metern zu Anwendung. Die Umfangsgeschwindigkeit liegt in der Regel bei 3 bis 4 m/s. Walzenbelüfter werden heute in erster Linie in Umlaufbecken verwendet. Die optimale Beckentiefe beträgt zwischen 2 und 3 Metern, im Einzelfall bis 4 Meter. Sind in einem Belebungsbecken mehrere Rotoren hintereinander angeordnet, so sollte der Rotorabstand nicht unter 15 Meter gewählt werden. Bei zu geringem Rotorabstand erhält man keine gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung über der Beckenhöhe und Sauerstoffeintrag und Sauerstoffertag nehmen ab (STALZER, FLECKSEDER 1975). Um die Sauerstoffzufuhr zu gewährleisten und gleichzeitig eine gute Durchmischung zu erreichen, müssen Leit- und Bremswände vorgesehen werden. Um die Strömung am Beckenende um 180° umzulenken, sind exzentrisch angeordnete senkrechte Leitwände vorzusehen. Die Umfassungswände in diesem Bereich sind ebenfalls strömungsgünstig auszubilden.

Die Sauerstoffzufuhreigenschaften bei der Stabwalzenbelüftung sind nur in sehr geringem Maß von der Abwasserzusammensetzung abhängig. Unter Betriebsbedingungen kann mit einem  $\alpha$ -Wert von 0,9 bis 1,0 gerechnet werden (KROISS 1991).

Durch intermittierenden Betrieb der Belüfter, Verwendung po-

lumschaltbarer Motoren für die Antriebe und Veränderung der Eintauchtiefe der Walzenbelüfter ist eine gute Regelbarkeit in weitem Bereich möglich.

Die auftretenden Geräusch- und Aerosol- Emissionen lassen sich durch technische Maßnahmen wie Verbreiterung der Betonbrücken, Schalldämmung der Antriebe und durch Aerosolsperren weitgehend vermeiden.

Abbildung 8: Mammutrotor

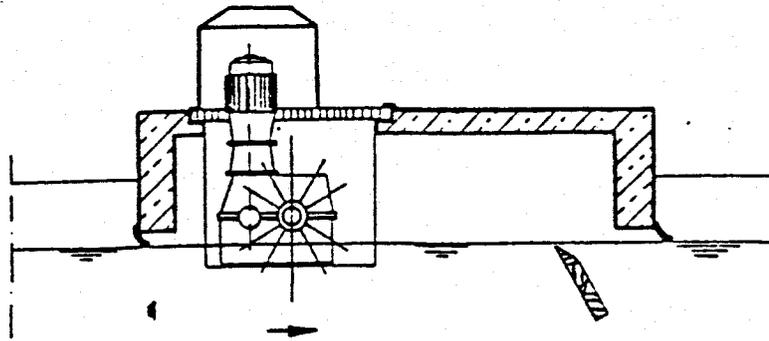
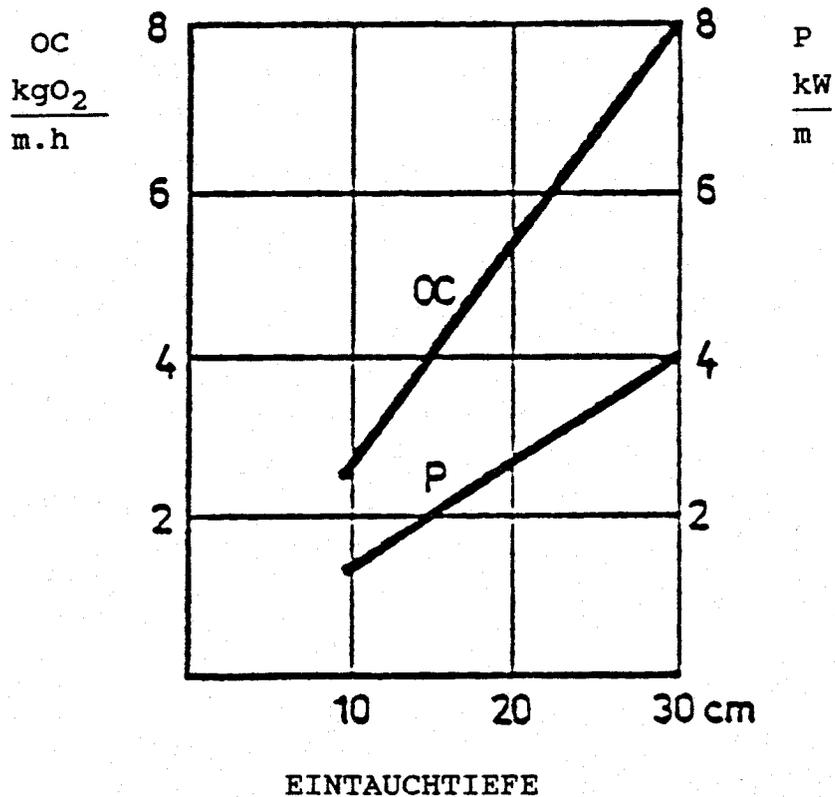


Abbildung 9: Sauerstoffzufuhrcharakteristik Mammutrotor



Die Zufuhrcharakteristik zeigt, daß bei steigender Eintauchtiefe und damit steigender spezifischer Leistung die Wirtschaftlichkeit, das heißt der Sauerstofftrag, abnimmt.

#### 4.2.2 Kreiselbelüfter

Kreiselbelüfter rotieren um eine um eine vertikale Antriebswelle. Die verschiedenen Konstruktionen der Kreiselbelüfter haben als gemeinsames Prinzip die zentralsymmetrische Umwälzung, wobei das Wasser mittig von unten angesaugt und radial über die Oberfläche geworfen wird. Der Sauerstoffeintrag erfolgt in erster Linie in der durch den Kreisel erzeugten Turbulenzzone an der Oberfläche. Es gibt offene und geschlossene Bauweisen, wobei die offene Bauweise den Vorteil hat, daß es praktisch zu keine Verstopfungen kommen kann.

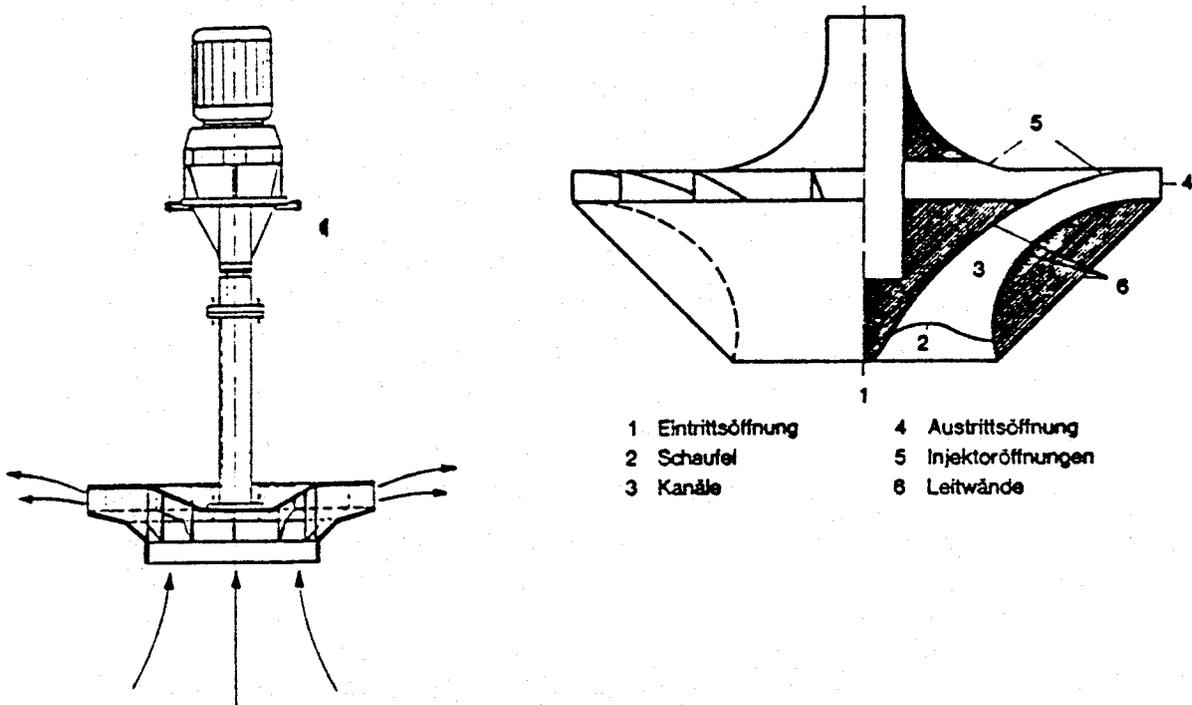
Der Durchmesser der Kreiselbelüfter beträgt bis 4 m und die Umfangsgeschwindigkeit liegt zwischen 4 und 6 m/s. Die Sauerstoffzufuhr kann für einige Fabrikate als Funktion der Einblastiefe, des Quadrates des Kreiseldurchmessers und der dritten Potenz der Umfangsgeschwindigkeit ausgedrückt werden (v.d.EMDE 1969). Durch den mit der Konstruktion festgelegten Durchmesser verbleiben für die Regelung der Sauerstoffzufuhr die Parameter der Eintauchtiefe und, als sehr wirksame Einflußgröße da mit der dritten Potenz eingehend, die Kreiseldrehzahl.

Kreisel werden entweder in quadratische Mischbecken oder auch in Umlaufbecken (Carrousel-System) eingebaut. Die nötige Leistungsdichte, um Ablagerungen zu vermeiden, wird in Mischbecken im Mittel mit  $15 \text{ W/m}^3$  (KALBSKOPF 1972) und für Umlaufbecken mit  $10 \text{ W/m}^3$  angegeben (PÖPEL/WAGNER 1989). Festzuhalten ist, daß die Strömungsgeschwindigkeit bei gleicher Leistungsdichte ( $\text{Watt/m}^3$  Becken) mit zunehmender Beckengröße ansteigt. Bei Mischbecken sollte das Verhältnis von Beckenbreite zur Tiefe etwa 4 zu 1 betragen. Eine günstige Wassertiefe liegt zwischen 3 und 4 Metern.

Um die Belästigung durch Aerosole möglichst gering zu halten sollte die Belüfterbrücke im Bereich des Kreisels möglichst

groß gestaltet werden und weit bis zur Wasseroberfläche herabreichen. In quadratischen Becken mit nur einem Kreisel kann es bei bestimmten Drehzahlen und Eintauchtiefen zu starken Wellenbewegungen im Becken kommen. Hierdurch entstehen für Motor und Getriebe große Belastungen. Abhilfe kann durch den Einbau von Bremskreuzen unter dem Kreisel und durch horizontale und senkrechte Bremstafeln geschaffen werden. Auch eine schwimmende Anordnung der Kreisel für die Belüftung von Abwasserteichen und Oberflächengewässern ist möglich.

Abbildung 10: Kreiselbelüfter



In vielen Anlagen finden man nach einigen Betriebsjahren direkt unter den Kreiseln Löcher im Beton. Diese entstehen aufgrund von Kavitationserscheinungen. Es empfiehlt sich daher stets unter dem Kreisel eine Stahlplatte anzuordnen.

#### 4.2.3 Leistungsdaten von Belüftungssystemen

Eine Auswertung von veröffentlichten Meßergebnissen (PÖPEL und WAGNER 1989) von, auf realisierten Abwasserreinigungsanlagen, durchgeführten Sauerstoffzufuhrversuchen ergibt:

Tabelle 1: Sauerstoffertragswerte nach PÖPEL/WAGNER 1989

	SAUERSTOFFERTRAG kg/kWh			
	REINWASSER		BETRIEB	
	günstig	mittel	günstig	mittel
flächige Druckbelüftung	3,2	2,4	1,9	1,4
Plattenbelüftung (Folien)	3,9	2,9	2,3	1,8
Umwälzung und Belüftung	3,0	2,3	1,8	1,4
Kreisel in Mischbecken	1,7	1,3	1,5	1,2
Kreisel in Umlaufbecken	2,1	1,6	1,9	1,4
Rotoren in Umlaufbecken	1,7	1,3	1,5	1,2

Unter "günstig" sind die Werte der Druckbelüftung bei ca.  $2 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  angegeben und auf  $5,5 \text{ Wh}/(\text{Nm}^3 \cdot \text{h})$  bezogen. Die "mittleren Bedingungen" sind mit 75% der günstigen Werte angesetzt. Für die Betriebsbedingungen wurde mit einem Sauerstoffzufuhrfaktor ( $\alpha$ -Wert) von 0,6 gerechnet.

Die angeführten Werte bei den Oberflächenbelüftern gelten für eine Leistungsdichte von ca.  $35 \text{ W}/\text{m}^3$ . Bei der Berechnung der für "Betrieb" angegebenen Daten wurde ein Sauerstoffzufuhrfaktor von 0,9 angenommen.

Im Gegensatz zu den Walzenbelüftern bei denen die Wirtschaftlichkeit bei steigender spezifischer Energie abnimmt, steigt bei den Kreiseln die Effizienz mit steigender Energiedichte. Die von PÖPEL/WAGNER 1989 veröffentlichten Werte decken sich hervorragend mit eigenen Messungen.

##### 5. Bemessung von Belüftungseinrichtungen

Ziel der Bemessung ist es, ausgehend von der ermittelten Sauerstoffzufuhr, mit Annahmen über das jeweilige Belüftungssystem die erforderliche Luftmenge bzw. die zu installierenden

Leistung festzulegen. Bei diesen Betrachtungen ist immer vom erforderlichen Regelbereich auszugehen und der Nachweis der Wirtschaftlichkeit speziell für mittlere Belastungen zu erbringen. Unabhängig vom Belüftungssystem sind jedenfalls der im Betrieb erforderliche Sauerstoffgehalt und der erwartete  $\alpha$ -Wert zu berücksichtigen. Außerdem ist die Kontrolle der ausreichenden Durchmischung, z.B. durch Nachrechnung des spezifischen Energieeintrages [ $W/m^3$ ], jedenfalls anzuraten.

Bei der Dimensionierung von Druckbelüftungen sind Annahmen über die Luftbeaufschlagung und die Einbaugeometrie zu treffen. Aufbauend auf Herstellerangaben bzw. Erfahrungswerten (KAYSER 1991, PÖPEL/WAGNER 1991) über die Sauerstoffausnutzung ( $[\%/m]$ ; [ $g/(Nm^3 \cdot m_{ET})$ ]) kann nun der Luftvolumenstrom und damit die Zahl der Belüfterelemente errechnet werden. Der Luftvolumenstrom und dessen erforderliche Variation bilden nun die Basis für die Verdichterauswahl.

Zur Sicherstellung der Durchmischung, in flächig belegten Mischbecken, reicht in der Regel ein Energieeintrag von  $10 [W/m^3]$ . Bei strömungsgünstigen Umlaufbecken sind auch bei geringeren Leistungsdichten keine Ablagerungen zu erwarten.

Für die Auslegung von Oberflächenbelüftern wird, wie bei der Druckbelüftung, von Erfahrungswerten oder Herstellerangaben (z.B. Mammutrotor [ $gO_2/(m \cdot h)$ ]) ausgegangen. Entsprechend den örtlichen Gegebenheiten wird die erforderliche Stückzahl und die zu installierende Antriebsleistung berechnet. Der notwendige Regelbereich ist durch Veränderung der Eintauchtiefe, der Drehzahl (vorwiegend bei Kreisel) und gegebenenfalls durch Zu- und Abschalten einzelner Aggregate sicherzustellen. Auch hier ist der Nachweis einer ordnungsgemäßen Durchmischung zu führen, für kleine Mischbecken ist eine Leistungsdichte  $\geq 15 [W/m^3]$  anzustreben, dieser Wert kann für große Misch- und Umlaufbecken reduziert werden.

## 6. Auswahlkriterien und Einsatzbereiche

Einer der begrenzenden Faktoren des Belebungsverfahrens ist die Sauerstoffzufuhr. Der Wahl des Belüftungssystems kommt daher für den Erfolg der Abwasserreinigung eine besondere Bedeutung zu. Bereits bei der Ausarbeitung des Verfahrenskonzeptes der Abwasserreinigungsanlage (entsprechend den Anforderungen des Gewässerschutzes und der rechtlichen Bestimmungen) sind Möglichkeiten und Grenzen der Belüftungssysteme entsprechend den örtlichen Bedingungen zu berücksichtigen.

Aus dem Verfahrenskonzept ergeben sich **technische und wirtschaftliche Anforderungen** an das Belüftungssystem, welche mit den technischen und wirtschaftlichen **Eigenschaften** des Belüftungssystems in Einklang zu bringen sind. Andernfalls beeinflussen die Eigenschaften des Belüftungssystems das Verfahrenskonzept, sodaß hier Änderungen vorgenommen werden müssen, bis eine Übereinstimmung hergestellt ist. Ausgangsbasis zur Wahl des Belüftungssystems sind Überlegungen, wie das vorgesehene Verfahrenskonzept am besten realisiert werden kann

Optimale Lösungen für Belüftungssysteme und Belebungsanlagen sind in konstruktiver und betrieblicher Hinsicht nur durch zweckmäßige Zuordnung von Verfahrenskonzepten, Beckenform und **Belüftungssystem** zu erreichen. Der Grad der geforderten Abwasserreinigung und die Abwasserbeschaffenheit bestimmen die Verfahrenstechnik. Die daraus resultierenden betrieblichen Anforderungen führen zu ein- oder zweistufigen Anlagen oder zu Misch-, Durchlauf-, Kaskaden- oder Umlaufbecken. Diese verschiedenen Systeme bedingen wiederum unterschiedliche Sauerstoffeintragungswerte und eine bestimmte Verteilung des Sauerstoffs im Belebungsbecken als auch Umwälz- und Mischverhältnisse.

Die Leistungsfähigkeit eines Belüftungssystems kann nur durch Berücksichtigung aller technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkte beurteilt werden, die für den gesicherten Betrieb einer Belebungsanlage Voraussetzung sind.

Die Anforderungen an kleine Anlagen für häusliches Abwasser, die nur stundenweise am Tag gewartet werden bzw. an Belüftungssysteme die auf Großanlagen oder Betriebsabwasserreinigungsanlagen im Einsatz sind, sind entsprechend unterschiedlich.

Je nach dem zur Verfügung stehenden Platz wird man Becken mit großer Oberfläche und geringer Tiefe bzw. Becken mit großer Tiefe und kleiner Oberfläche zu errichten suchen. Die Wahl der Beckentiefe hat eine wesentliche Rückwirkung auf das einzusetzende Belüftungssystem. Der wirtschaftlich optimale Bereich von Oberflächenbelüftern, z.B. Mammutrotoren, liegt bei 2 - 4 m, wogegen bei statischen Belüftern und Injektorbelüftern erst bei Beckentiefen über 6 m wirtschaftlich gearbeitet werden kann. Untergrundverhältnisse wie die Bodenart, Höhe des Grundwasserspiegels und des Hochwasserspiegels beeinflussen maßgeblich die zu wählende Beckentiefe.

Aus energetischer Sicht ist der Sauerstoffenertrag [ $\text{kgO}_2/\text{kWh}$ ] oder der spezifische Energieaufwand [ $\text{kWh}/\text{BSB}_5$ ] ein Vergleichswert für die Wahl des Belüftungssystems. Daneben ist jedoch die Sauerstoffzufuhr [ $\text{kgO}_2/\text{h}$ ] ein sehr wesentlicher Wert. Das vorgesehene Belüftersystem muß in jedem Falle unter Berücksichtigung der Abwassereigenschaften, der Einsatzart und der Betriebsweise den gestellten Anforderungen an die Sauerstoffzufuhr und Umwälzung genügen.

Für die Wahl des Belüftungssystems sind die zu erwartenden Betriebsverhältnisse und der erforderliche Regelbereich festzulegen. Es ist dann zu prüfen, welches Belüftungssystem unter diesen Verhältnissen günstige Sauerstoffenertragswerte erbringt. Die Energiekosten werden durch den Sauerstoffenertrag des Belüftungssystems unter Betriebsbedingungen und der Möglichkeit, die Sauerstoffzufuhr an den Sauerstoffverbrauch anzupassen, bestimmt. Die Charakteristik (Sauerstoffenertrag - Energiedichte) ist daher für die resultierende Wirtschaftlichkeit des Belüftungssystems wesentlich. Es ist daher zweckmäßig, die Regelbarkeit stärker bei der Wahl des Belüftungssystems zu

berücksichtigen.

Die hydraulischen Verhältnisse, die im Belebungsbecken durch das Belüftungssystem oder Systeme zur getrennten Umwälzung erreicht werden, sind ein weiteres wichtiges Auswahlkriterium. Umwälzung oder Durchströmung müssen so hoch sein, daß belebter Schlamm, Biomasse, Substrate und Sauerstoff gleichmäßig vermischt und Schlammablagerungen an der Beckensohle vermindert werden.

Im Hinblick auf die steigenden Ansprüche an die Umweltverträglichkeit ist bei der Wahl der Belüfter zu berücksichtigen, daß durch geeignete Maßnahmen Aerosol- als auch Lärm- und Geruchsemissionen vermieden werden.

Wenn die verfahrenstechnischen Anforderungen erfüllt sind, bleibt die Frage der Bewährung des Belüftungssystems unter den gegebenen bzw. den zu erwartenden Betriebsverhältnissen. Die Betriebssicherheit und Verfügbarkeit des Belüftungssystems dürfen weder durch Abwasserinhaltsstoffe, betriebliche und klimatische Schwankungen und insbesondere nicht durch technisch unzureichende Ausrüstung und Materialwahl gefährdet werden. Von Bedeutung ist hierbei die Verstopfungsanfälligkeit und Alterung bei Druckbelüftern und das Festsetzen von Faserstoffen an bewegte Teile von Oberflächenbelüftern. Ferner muß die Beständigkeit gegen mechanische und chemische Angriffe und nicht zuletzt die Betriebssicherheit und ein geringer Wartungsaufwand für die Belüfter, Gebläse, Getriebe und Motoren gegeben sein. Neben den zu erwartenden Anschaffungskosten und Betriebskosten des Belüftungssystems wird bei den heutigen Lohnkosten der Aufwand für zusätzliche Wartungsarbeiten bedeutend. So ist bei kleineren Anlagen der Aufwand für zusätzliche tägliche Wartungsarbeiten bedeutend höher als der durch den eventuell erhöhten Leistungsbedarf eines betriebssicheren Belüftungssystems mit geringerem Sauerstofftrag. Betriebssicherheit muß besonders auf kleineren Kläranlagen daher Vorrang haben.

Eine alleinige Betrachtung des Sauerstoffertes und der Anschaffungskosten als Entscheidungskriterium für die Auswahl eines Belüftungssystems ist nicht zielführend. Vielmehr ist ein echter Kostenvergleich verschiedener Belüftungssysteme nur über die Jahreskosten (Kapitalkosten und Betriebskosten) der gesamten Abwasserreinigungsanlage möglich.

### 8. Berechnungsbeispiel

Diese Ausführungen schließen an das Beispiel von Prof.v.d.EMDE des Vortrages 5 "Die Entwicklung des Volumens von Becken zur C- und N-Elimination nach dem ATV- Arbeitsblatt A131" an. Die erforderlichen Ausgangsdaten sind dort zusammengefaßt.

#### Lastfall 1: Nitrifikation, 10°C

$t_{TS}$ für $V_D/V = 0,4$	15	d
$OV_C$ aus Tabelle 9	1,32	kgO <sub>2</sub> /kgBSB <sub>5</sub>
maximale Kohlenstoffbelastung ( $f_N = 1$ )		
$f_C$	1,15	-
TKN <sub>O</sub>	50	mg/l
N <sub>ÜS</sub> 0,05 · 225	11	mg/l
org. N	1	mg/l
NH <sub>4</sub> -N <sub>e</sub>	2	mg/l
NO <sub>3</sub> -N <sub>e</sub> = TKN <sub>O</sub> - (org.N) - (N <sub>ÜS</sub> ) - (NH <sub>4</sub> -N <sub>e</sub> )	36	mg/l
$OV_N = 4,6 \cdot NO_3-N_e / BSB_5 = 4,6 \cdot 36 / 225$	0,74	kg/kg
Druckbelüftung 5m Einblastiefe		
Einblastiefenkorrektur $1+(5/20,7)$	1,24	-
korr. Sättigungswert $11,3 \cdot 1,24$	14,1	mg/l

$$O_B = \frac{C_S}{C_S - C_X} \cdot (OV_C \cdot f_C + OV_N \cdot f_N)$$

$$= \frac{14,1}{14,1-2} \cdot (1,32 \cdot 1,15 + 0,74 \cdot 1) = 2,64 \text{ kg/kg}$$

maximale Stickstoffbelastung ( $f_C = 1$ )

$f_N$ $t_{TS} = 15 \text{ d}; 40 \text{ 000EW}$	1,8	-
$O_B = 1,17 \cdot (1,32 \cdot 1 + 0,74 \cdot 1,8)$	3,10	kg/kg

Lastfall 2: Nitrifikation und Denitrifikation, 10°Cmaximale Kohlenstoffbelastung ( $f_N = 1$ )

$$\text{NO}_3\text{-N}_e + \text{NO}_2\text{-N}_e \quad 10 \quad \text{mg/l}$$

$$\text{NO}_3\text{-N}_D \quad 26 \quad \text{mg/l}$$

$$\text{OV}_N = \frac{(4,6 \cdot \text{NO}_3\text{-N}_e + 1,7 \cdot \text{NO}_3\text{-N}_D)}{\text{BSB}_5}$$

$$\text{OV}_N = \frac{4,6 \cdot 10 + 1,7 \cdot 26}{225} \quad 0,40 \text{ kg/kg}$$

$$\text{O}_B = 1,17 \cdot (1,32 \cdot 1,15 + 0,40 \cdot 1) \quad 2,24 \text{ kg/kg}$$

maximale Stickstoffbelastung ( $f_C = 1$ )

$$\text{O}_B = 1,17 \cdot (1,32 \cdot 1 + 0,4 \cdot 1,8) \quad 2,39 \text{ kg/kg}$$

Lastfall 3: Nitrifikation und Denitrifikation, 20°C

$$t_{TS} \quad (\text{TS}_R = 2,8 \text{ g/l}) \quad 10 \quad \text{d}$$

$$\text{OV}_C \text{ aus Tabelle 9} \quad 1,45 \text{ kgO}_2/\text{kgBSB}_5$$

maximale Kohlenstoffbelastung ( $f_N = 1$ )

$$f_C \quad 1,20 \text{ -}$$

$$\text{OV}_N = \frac{4,6 \cdot 10 + 1,7 \cdot 26}{225} \quad 0,40 \text{ kg/kg}$$

$$\text{korr. Sättigungswert} \quad 9,0 \cdot 1,24 \quad 11,2 \text{ mg/l}$$

$$\text{O}_B = \frac{9 \cdot 1,24}{9 \cdot 1,24 - 2} \cdot (1,45 \cdot 1,20 + 0,4 \cdot 1) \quad 2,61 \text{ kg/kg}$$

maximale Stickstoffbelastung ( $f_C = 1$ )

$$f_N \quad 2,3 \text{ -}$$

$$\text{O}_B = 1,22 \cdot (1,45 \cdot 1 + 0,4 \cdot 2,3) \quad 2,89 \text{ kg/kg}$$

Sauerstoffzufuhr in Reinwasser

$$\text{OC}^* = \frac{\text{O}_B \cdot \text{B}_{\text{dBSB}_5}}{24 \cdot \alpha}$$

Sauerstoffzufuhrfaktor angenommen 0,6

$$\text{Lastfall 1: } 3,1 \cdot 1800 / (24 \cdot 0,6) \quad 387 \quad \text{kgO}_2/\text{h}$$

$$\text{Lastfall 2: } 2,2 \cdot 1800 / (24 \cdot 0,6) \quad 280 \quad \text{kgO}_2/\text{h}$$

9. Literatur

- ABELING U., HÄRTEL L., HARTWIG P., NOWAK O., OTTERPOHL R.,  
SCHWENTNER G., SVARDAL K., WOLFFSON C.: Bemessung von  
Kläranlagen zur Stickstoffelimination. Korr. Abw.38,  
222-227 (1991)
- ATV-Arbeitsblatt 131 : Bemessung von einstufigen Belebungsan-  
lagen ab 5000 Einwohnerwerten, Gesellschaft zur Förde-  
rung der Abwassertechnik e.V. (GFA), St. Augustin,  
(1991)
- ATV 1985: Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik, Band IV,  
Verlag Wilhelm Ernst & Sohn (1985)
- DANCKWERTS P.V.: Gas-Liquid Reactions, McGraw-Hill Book  
Company, New York/London/Düsseldorf (1970)
- v.d.EMDE W.: Beitrag zu Versuchen zur Abwasserreinigung mit  
belebtem Schlamm. Veröffentlichungen des Instituts für  
Siedlungswasserwirtschaft der TH Hannover, Heft 1  
(1957).
- v.d.EMDE W.: Belüftungssysteme und Beckenformen, Münchner Bei-  
träge (1969)
- v.d.EMDE W.: Berechnung von Sauerstoffverbrauch und Sauer-  
stoffzufuhr sowie Stoffbilanzen, Fortbildungskurs "Bio-  
logische Abwasserreinigung", (1979), TU-Wien
- FREY W.: Sonderbauformen von Belüftungssystemen, 1. Gem. Was-  
sertechnisches Seminar, WAR Band 54, Darmstadt (1991)
- HIGBIE R.: The rate of absorption of pure gas into a still  
liquid during short periods of exposure,  
Trans.Amer.Instn.Chem. Engrs. 31 (1935), 365-89
- KAYSER R.: Ein Ansatz zur Bemessung einstufiger Belebungsanla-  
gen für Nitrifikation/Denitrifikation, gwf -  
wasser/abwasser (1983) 124, H.9, S.419-427
- KAYSER R.: Berechnungsbeispiel für die Stickstoffentfernung,  
Veröffentlichung des Institutes für Siedlungswasser-  
wirtschaft, Heft 50, Braunschweig (1991)
- KROISS H.: Perspektiven der Anwendung von Oberflächenbelüf-  
tern, 1. Gem. Wassertechnisches Seminar, WAR Band 54,  
Darmstadt (1991)
- LEWIS W.K., WHITEMAN W.G.: Principles of gas absorption,

Ind.Engng.Cem. 16 (1924) 12, 1215-20

- MATSCHE N.: Design Considerations for Integrated Nutrient Removal Systems by P.M.SUTTON Discussion by N.MATSCHE, Prog.Wat.Tech. (1978), Vol.10, No.5/6, pp. 1033-1037
- MATSCHE N.: Influencing parameters on the nitrification-denitrification performance of a single stage activated sludge plant, Prog.Wat.Tech. (1980), Vol.12, No.5,, pp. 551-563
- NOWAK O., SVARDAL K.: Nitrifikation - Denitrifikation, Wiener Mitteilung, Band 81 2.Auflage, TU Wien (1990)
- PÖPEL H.J., WAGNER M.: Grundlagen von Belüftung und Sauerstoffeintrag, 16. Wassertechnisches Seminar, WAR Band 37, Darmstadt (1989)
- PÖPEL H.J., WAGNER M.: Grundlegende Einflußfaktoren zur Optimierung von Druckbelüftungssystemen, 1. Gem. Wassertechnisches Seminar, WAR Band 54, Darmstadt (1991)
- SELL G.: Radialstromdüsen in der Abwassertechnik, 7. Wassertechnisches Seminar, WAR Band 23, Darmstadt (1985)
- STALZER W.F., FLECKSEDER H.: Strömungsverhältnisse, Energieaufnahme und Sauerstoffzufuhr in langgestreckten Umlaufbecken am Beispiel der Kläranlage Wien-Blumental, Österr. Abwasser Rundschau, (1975), 82-89
- SVARDAL K., NOWAK O.: Bemessungsansätze, Fortbildungskurs 25.-26. Feber 1992, Anpassung von Kläranlagen an den Stand der Technik, TU Wien (1992)
- WAGNER M.: Einfluß oberflächenaktiver Substanzen auf Stoffaustauschmechanismen und Sauerstoffeintrag, Dissertation, WAR Band 53, Darmstadt (1991)

FREY Wilhelm Dipl.Ing.

Institut für Wassergüte und Landschaftswasserbau

Technische Universität Wien

Karlsplatz 13

A-1040 Wien