

## ANFORDERUNGEN AN BELÜFTUNGSSYSTEME

W. Frey

1. EINLEITUNG

War vor wenigen Jahren noch die Entfernung von Kohlenstoff-  
verbindung das primäre Ziel der biologischen Abwasserreini-  
gung, so hat heute die Umwandlung und Elimination von Stick-  
stoff- und Phosphorverbindungen an Bedeutung gewonnen. Diese  
Tatsache spiegelt sich in der Verfahrenstechnik moderner, dem  
Stand der Abwasser-Gesetzgebung entsprechenden, Abwasserrei-  
nigungsanlagen wider. War früher zuviel Sauerstoff "nur" ein  
Kostenfaktor, so ist heute ein Sauerstoffangebot in Bereichen  
der Denitrifikation und biologischen Phosphorentfernung eine  
Kontraindikation. Aufgrund der sich wandelnden Anforderungen  
an das Reinigungsziel von Abwasserbehandlungsanlagen sind  
auch die Anforderungen an das Belüftungssystem (v.d.EMDE  
1979; FREY 1990) zu ergänzen.

Ausgehend vom Reinigungsziel ist, unter Einbeziehung der Ab-  
wasserbeschaffenheit, dem Abwasseranfall, den örtlichen Gege-  
benheiten, etc., die erforderliche Verfahrenstechnik festzu-  
legen. Darauf wurde im diesem Seminar bereits mehrfach ein-  
gegangen. In diesem Vortrag sollen die aus den verschiedenen  
Möglichkeiten resultierenden Anforderungen auf das Belüf-  
tungssystem fokussiert werden.

Die wichtigsten Punkte sind

- wieviel Sauerstoff muß und kann
- wo zur Verfügung gestellt werden.

Zum Punkt "wieviel" gilt, daß die Sauerstoffzufuhr an den  
Sauerstoffbedarf (Stichwort: Regelbarkeit) anzupassen ist.  
Die Belastungsschwankungen resultieren aus dem Tagesgang,  
Wochengang, saisonalen und kampagnebedingten Schwankungen

(HAHN u. NEIS 1985). Darunter sind zunächst nur die Veränderungen der Frachten der einzelnen Fraktionen (Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor) zu verstehen.

Die Frage des "wo" (Stichwort: aerobes/anoxisches Volumen) ist der Sauerstoff bereit zu stellen hat mehrere Teilbereiche. Anknüpfend an die oben angesprochenen Belastungsschwankungen sind hier die Veränderungen der Verhältnisse der einzelnen Fraktionen untereinander (z.B. CSB:N) wesentlich. Ein weiterer Gesichtspunkt ist die Abwassertemperatur. In Abhängigkeit der Abwassertemperatur variieren die Anforderungen an die Stickstoffentfernung und damit die Aufteilung des Beckenvolumens (bzw. der Belüftungs- und Pausenzeiten) in aerobe/anoxische Bereiche. Die Frage könnte auch negativ formuliert werden "wo nicht", hierzu möchte ich auf den Vortrag "Wechselwirkungen zwischen Stickstoff- und Phosphorentfernung" verweisen.

Daneben sind aber auch die sensiblen Bereiche der "umweltrelevanten" Anforderungen, wie Aerosolbildung, Geruchs- und Lärmentwicklung zu beachten.

## 2. ANFORDERUNGSPROFIL

Im wesentlichen wird zwischen Druckbelüftungssystemen und Oberflächenbelüftern unterschieden. Die Belüftungseinrichtung soll, je nach Bauausführung und Verfahrenstechnik der Anlage sind nicht alle für jedes System relevant, folgende Forderungen erfüllen:

- ausreichende Sauerstoffzufuhr, um den Sauerstoffbedarf der Mikroorganismen abzudecken
- intensive Durchmischung des Abwasserschlammgemisches
- ausreichende Strömungsgeschwindigkeit im Becken, um Ablagerungen zu vermeiden. Bei manchen Systemen hängt die Sohlgeschwindigkeit von der Energiedichte ab, wodurch eine mini-

male Leistungsdichte und damit die minimale Sauerstoffzufuhr festgelegt ist.

- geeignet für den gemeinsamen Einsatz mit Rührwerken zur getrennten Umwälzung
- möglichst großer Regelbereich (mindestens 5:1 oder besser 10:1) entsprechend den Belastungsverhältnissen
- einfache Regelbarkeit des Belüftungssystems
- für intermittierende Betriebsweise geeignet
- abstellbar entsprechend der Anlagenkonzeption (z.B. Nutzung der Bio-P-Stufe bei niederen Temperaturen zu Sicherstellung der Nitrifikation; saisonale Schwankungen; geringer Anschlußgrad von Neuanlagen)
- möglichst geringe Aerosol-, Geruchs- und Lärmemissionen
- bei nachgeschalteter Abluftbehandlung möglichst geringe Abluftmengen, dh. hohe Sauerstoffausnutzung
- bei geringer Säurekapazität keine hohe Sauerstoffausnutzung (hier sind Neutralisationsmittelbedarf und Energiemehraufwand gegenüberzustellen)
- hohe Betriebssicherheit (kein Verstopfen der Belüfter)
- geringer Energiebedarf für Sauerstoffzufuhr und Durchmischung (über möglichst großen Bereich der Sauerstoffzufuhr)
- niedrige Bau- und Anschaffungskosten für das Belebungsbecken, die Belüftungseinrichtung und die Regeleinrichtung
- Beständigkeit gegen mechanische und chemische Angriffe
- geringer Wartungsaufwand für die Belüfter

### 3. AUSLEGUNG VON BELÜFTUNGSSYSTEMEN

Unter der Auslegung eines Belüftungssystems ist neben der Ermittlung des Sauerstoffverbrauches auch die Umrechnung auf die erforderliche Sauerstoffzufuhr unter Betriebsbedingungen sowie die Auswahl und Dimensionierung der einzelnen Komponenten zu verstehen. Bemessungsansätze zur Berechnung des Sauerstoffbedarfes einer Belebungsanlage findet man in der Literatur (ATV 1991, v.d.EMDE 1991, FREY 1992, PÖPEL 1991, SVARDAL

u. NOWAK 1992). An dieser Stelle soll die Aussagekraft der Resultate beleuchtet und Schlußfolgerungen für die Auslegung des Belüftungssystems abgeleitet werden.

Die Ausgangsdaten sind maximale Bemessungswerte. Liegt ausreichend Datenmaterial für die Berechnung des maximal auftretenden Sauerstoffbedarfes vor? Der maximal berechnete Sauerstoffverbrauch ist jedenfalls abzudecken! Wenn keine gesonderten Messungen über die maximale Kohlenstoff- bzw. maximale Stickstoffbelastung vorliegen, kann nach A131 mit Spitzenfaktoren gerechnet werden. Da die Spitzen sehr häufig nicht gleichzeitig auftreten ist der größere der beiden Lastfälle (entweder als C- oder N-Spitze) für die Auslegung zu verwenden.

Bei der Umrechnung des Sauerstoffbedarfes auf die erforderliche Sauerstoffzufuhr unter Betriebsbedingungen ist der Sauerstoffgehalt in der Belebung sowie der  $\alpha$ - und  $\beta$ -Wert zu berücksichtigen. Grenzflächenaktive Stoffe (Tenside) setzen die Oberflächenspannung herab. Dadurch bilden sich kleinere Blasen, was an sich günstig wäre, aber die Tenside reichern sich an der Phasengrenze an und behindern den Stoffdurchgang. Nach Untersuchungen von WAGNER (1991) haben die in letzter Zeit zunehmend mehr in Waschmitteln enthaltenen nichtionogenen Tenside einen noch negativeren Einfluß als die bisher überwiegend anionischen Tenside.

Als Richtlinie kann gelten: je größer das Schlammalter ist desto kleiner kann der Sauerstoffgehalt im Belebungsbecken angesetzt werden. Für den Abminderungsfaktor der Sauerstoffzufuhr unter Betriebsbedingungen, den  $\alpha$ -Wert, kann für hohes Schlammalter (niedere Schlammbelastung) ein größerer  $\alpha$ -Wert als für kleines Schlammalter (hohe Schlammbelastung) angesetzt werden. Da mit zunehmender Reinigung der  $\alpha$ -Wert besser wird ist für längsdurchströmte Belebungsbecken ein mittlerer Abminderungsfaktor zu wählen. In kommunalem Abwasser kann mit  $\beta=1$  gerechnet werden. Bei der Abschätzung des  $\alpha$ -Wertes für

Industrieabwasserbehandlungsanlagen ist zu berücksichtigen, daß mit zunehmendem Salzgehalt auch der Abminderungsfaktor steigt aber der Sättigungswert und damit der  $\beta$ -Wert abnimmt (bei 10 mg/l Chloriden im Abwasser ist  $\beta$  ca. 0,9). In Summe wirken hohe Salzkonzentrationen dennoch positiv auf den Sauerstoffeintrag.

Im Hinblick auf das Verfahrenskonzept sind auch die Minimalwerte zu überprüfen. Steht noch ausreichend Mischungsenergie zur Verfügung oder sind jedenfalls Rührwerke vorzusehen? Wird möglichst wenig, besser überhaupt kein Sauerstoff oder Nitrat in anaerobe Bereiche beim Bio-P gebracht? Wird Sauerstoff in anoxische Bereiche eingebracht (Denitrifikation)?

- Die Beurteilung, ob durch die Belüftung die Umwälzung und Mischung gewährleistet ist, kann in erster Näherung durch eine Abschätzung der Energie, die zur Verdrängung des Wassers notwendig ist, erfolgen. Zum Verschieben eines Kubikmeters Wasser um einen Meter sind  $e = 2,72 \text{ Wh/m}_L^3/\text{m}_{ET}$  notwendig. Wenn noch die Volumsänderung während des Aufstiegens der Luftblasen berücksichtigt wird erhält man die spezifische Mischleistung ( $P_{BB}$ ) zu:

$$P_{BB} = q_L \cdot \left( \frac{20,7}{20,7+ET} \right) \cdot ET \cdot e$$

$P_{BB}$	$q_L$	ET	e
$\frac{W}{\text{m}_{BB}^3}$	$\frac{\text{Nm}^3}{\text{m}_{BB}^3 \cdot h}$	m	$\frac{\text{Wh}}{\text{Nm}_L^3 \cdot \text{m}_{ET}}$

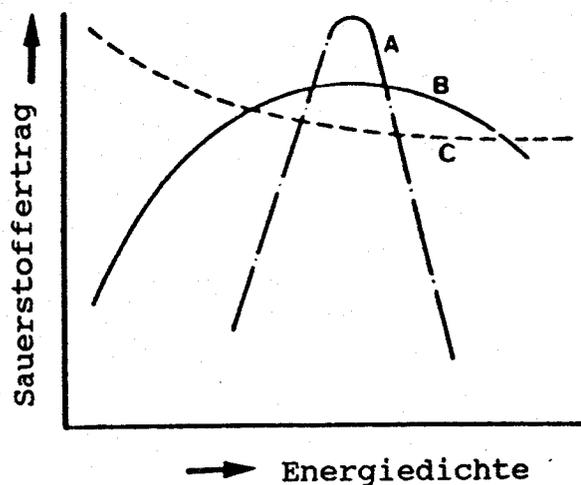
Bei ungünstiger Beckengeometrie ist unter Umständen eine spezifische Mischenergie  $> 20 \text{ W/m}_{BB}^3$  notwendig um Ablagerungen zu vermeiden, im Fall von strömungsgünstig ausgebildeten Umlaufbecken können auch schon  $3 \text{ W/m}_{BB}^3$  genügen (v.d.EMDE 1971; KNOP u. KALBSKOPF 1969). Unter der Annahme, daß mindestens  $5 \text{ W/m}_{BB}^3$  erforderlich sind erhält man bei einer mittleren Einblastiefe von 5 Meter eine minimale Luft-

menge von ca.  $0,5 \text{ Nm}^3/\text{m}^3_{\text{BB}}/\text{h}$ . Der Luftbedarf einer Anlage mit Stickstoffelimination liegt, bei 100% Auslastung, nach RIEGLER u. CAPITAIN (1989) bei ca.  $0,6 \text{ Nm}^3/\text{m}^3_{\text{BB}}/\text{h}$ . Da der Sauerstoffbedarf im Normalbetrieb vielfach in einem Verhältnis von 5:1 variiert, wird man häufig um Mischaggregate nicht herumkommen.

- Aus einer Sauerstoffmassenbilanz um anoxische Beckenbereiche erhält man Aufschluß über den eingebrachten Sauerstoff. Daraus lassen sich Rückschlüsse auf "vergeudete" Denitrifikationskapazität ziehen. Bei hohem TKN:BSB<sub>5</sub> (>0,2) Verhältnis bedeutet das, daß je Kilogramm Sauerstoff 0,35 Kilogramm Nitratstickstoff weniger denitrifiziert werden können.

Bei der Auswahl eines Belüftungssystems ist neben der Wirtschaftlichkeit im Auslegungspunkt auch das Verhalten im Teil- und Überlastbereich zu prüfen. Die Erfahrung zeigt, daß Belüftungssysteme im Normalfall bei 50-70% ihrer Maximalleistung betrieben werden. Der Sauerstoffertrag in diesem Leistungsbereich ist daher für die Betriebskosten maßgeblich. Belüftungseinrichtungen mit hohem Niveau und flachem Verlauf sind für einen wirtschaftlichen Betrieb wünschenswert. Dabei ist die Anlagenkonzeption zu berücksichtigen und die Betriebszustände in den einzelnen Becken- bzw. Beckenteilen zu beachten.

Abbildung 1: Sauerstoffertrag - Energiedichte



Die Belebungsbeckentemperatur hat wesentlichen Einfluß auf die Reinigungsleistung. Die Frage ob das Belüftungssystem einen Einfluß (Erwärmung oder Abkühlung) auf die Belebungsbeckentemperatur hat soll an dieser Stelle mit einer Energiebilanz geklärt werden.

#### DRUCKBELÜFTUNGSSYSTEME

Nach dem 1.Hauptsatz der Wärmelehre erhöht sich die innere Energie eines Systems um die Summe aus der dem System zugeführten Arbeit plus der zugeführten Wärme. Umgelegt auf die beiden Systemteile, Verdichterstation und Belebungsbecken, bedeutet das:

- die elektrische Energie wird über den Antrieb und den Verdichter in heiße Druckluft umgewandelt, dabei treten Verluste (Antrieb, Kupplung, Getriebe, Verdichter) von 20-50% auf. Diese heiße Druckluft wird über Rohrleitungen zum Belebungsbecken gefördert, dabei wird Wärme an die Umgebung abgegeben und es treten Druckverluste auf. Zum Belebungsbecken gelangen noch ca. 40-70% der eingesetzten elektrischen Energie.
- Im Belebungsbecken findet nun ein Wärmetausch statt und es wird Volumsänderungsarbeit verrichtet. Die aus dem Belebungsbecken austretende Luft hat (wenn die Differenz der Ansauglufttemperatur und der Belebungsbeckentemperatur nicht zu groß ist) näherungsweise die gleiche innere Energie wie die angesaugte Luft, also findet man die zugeführten 40-70% der ursprünglich eingesetzten elektrischen Arbeit als Wärme im Belebungsbecken.

#### OBERFLÄCHENBELÜFTER

Hier ist die Situation etwas einfacher. Die im Antriebsmotor, Kupplungen und Getriebe auftretenden Verluste betragen ca. 10%-20%. Die verbleibenden 80%-90% werden in das Belebungsbecken in Form mechanischer Arbeit eingetragen und finden sich dort ebenfalls als Wärme wieder.

Die aus dem Leistungseintrag des Belüftungssystems resultierende Temperaturerhöhung kann man wie folgt berechnen:

$$\Delta T = \frac{P}{\dot{m} \cdot c_p}$$

$\Delta T$  ... Temperaturdifferenz

P .... aufgewendete Belüfterleistung minus aller Verluste

$\dot{m}$  .... Massenstrom des Zulaufs in das Belebungsbecken

$c_p$  ... spezifische Wärmekapazität von Wasser ( $4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$ )

Erstellt man nun eine Energiebilanz in der auch die biogene Wärmeproduktion aus den biologischen Prozessen sowie die Wärmeabgabe durch Konvektion und Verdunstung berücksichtigt wird, zeigt sich, daß die Wärmezufuhr durch das Belüftungssystem, im Verhältnis zu den anderen Parametern, von untergeordneter Bedeutung ist! An den Beispielen der Kläranlagen Asten und der BARA einer Zuckerfabrik soll der Einfluß des Belüftungssystems veranschaulicht werden. Der Beobachtungszeitraum liegt im Winter bei 5 bis 10°C Lufttemperatur, Windverhältnisse unbekannt.

Die wichtigsten Daten der Anlage Asten sind:

Belebung: 4 abgedeckte Umlaufbecken (15m Breite, 100m Länge, Wassertiefe 7,2m) mit je 11000 m<sup>3</sup>

Belüfter: Druckbelüftung, Mischstrahldüsen

Anlagenbelastung: 160000m<sup>3</sup>/d,  $B_{R,CSB}=1,0 \text{ kg/m}^3/\text{d}$ ,  $T_{BB} \geq 10^\circ\text{C}$

Die Auswertung von Temperaturaufzeichnungen des Belebungsbeckenzu- und Belebungsbeckenablaufs ergab als Monatsmittelwert eine Abkühlung von ca. 0,4°C. Die maximale Temperaturerhöhung des Belebungsbeckenzulaufs durch die Belüftung errechnet man zu 0,05°C! Die Abschätzung der Verdunstungswärme zeigt, daß sie ca. 10% der Gesamtverluste beträgt. Der Einfluß der Abdeckung auf die Wärmebilanz, durch Rückgewinn der Kondensationswärme, liegt daher in dieser Größenordnung, dh. es treten zusätzlich maximal 10% Verluste auf wenn keine Abdeckung vorhanden ist. In diesem Fall wurde das einer zusätzlichen Abkühlung von ca. 0,2°C entsprechen!

Die wichtigsten Daten der Zuckerfabriksanlage sind:

Belebung: 1 offenes Umlaufbecken mit Trapezquerschnitt (20m Breite, 300m Länge, Wassertiefe 2,5m) mit 16000 m<sup>3</sup>

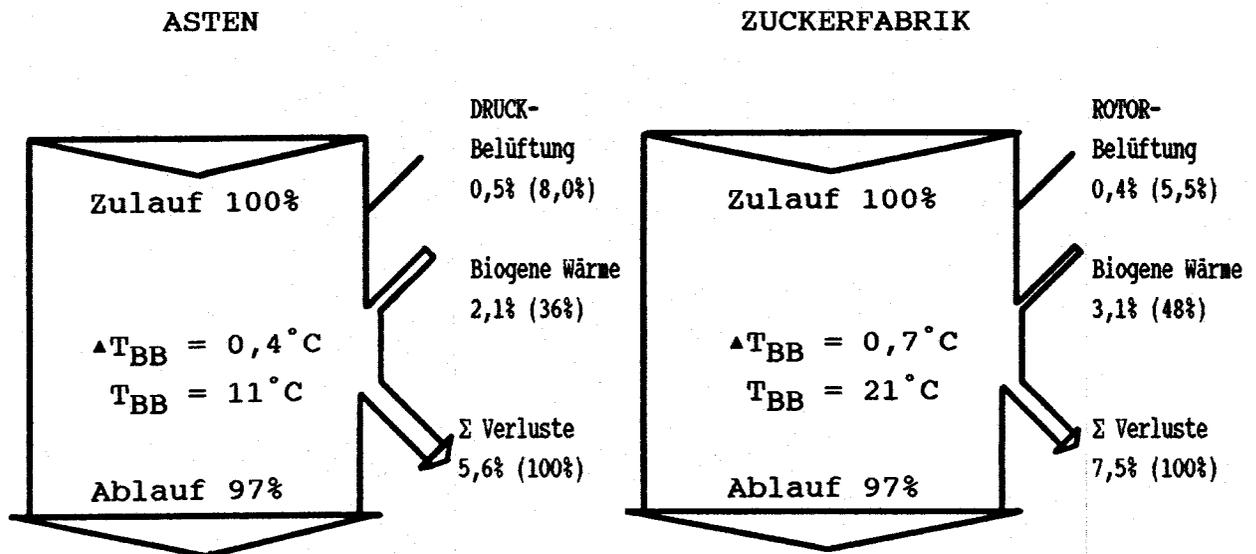
Belüfter: Oberflächenbelüfter, 16 Mammutrotoren mit je 9 m

Anlagenbelastung: 45000m<sup>3</sup>/d,  $B_{R,CSB}=1,7 \text{ kg/m}^3/\text{d}$ ,  $T_{BB} \geq 20^\circ\text{C}$

Für die Anlage liegen umfangreiche Temperaturdaten vor. Es konnte nachgewiesen werden, daß die spezifische Abkühlung im Belebungsbecken und Nachklärbecken praktisch gleich groß ist, also eine zusätzliche Abkühlung des Belebungsbeckens durch die Oberflächenbelüfter nicht gegeben ist (MAIR 1985). Die Abkühlung im Belebungsbecken beträgt hier 0,7°C. Die Temperaturerhöhung des Belebungsbeckenzulaufs durch die Oberflächenbelüfter errechnet man zu maximal 0,1°C!

In den nachfolgenden Energieflußdiagrammen sind die Größenordnungen der Energieströme veranschaulicht.

Abbildung 2: Energieflußdiagramme (Belebungsbecken)



Obige Energiebetrachtungen zeigen deutlich, daß der Einfluß des Belüftungssystems auf die Belebungsbeckentemperatur von vernachlässigbarer Größe ist. Die Wahl des Belüftungssystems hat also keinen Einfluß auf die Bemessungstemperatur und damit auf die Reinigungsleistung der Anlage.

### 3.1 Kriterien für Druckbelüftungssystemen

Es soll nun versucht werden das obige Anforderungsprofil auf die Systemkomponenten zu übertragen und zusätzliche Kriterien herauszuarbeiten.

Bei Druckbelüftungssystemen steigt die Sauerstoffzufuhr (OC in  $\text{kgO}_2/\text{m}^3\text{Becken/h}$ ) in etwa proportional zur Luftmenge und proportional zur Einblastiefe (v.d.EMDE 1968). Daraus ist abzuleiten, daß Luftmenge und Beckentiefe austauschbar sind und bei gleichem Sauerstoffeintrag nahezu identische Wirtschaftlichkeit erzielt werden kann. Bei kleiner Luftbeaufschlagung je Belüfter steigt die Sauerstoffausnutzung und der Sauerstofftrag. Bei größeren Einblastiefen steigt der Sauerstoffsättigungswert und damit geringfügig die spezifische Sauerstoffausnutzung. Aus diesen Zusammenhängen ist aber nicht abzuleiten, daß

- möglichst tiefe Becken
- wenig Luft und
- viele Belüfter

immer die wirtschaftlichste Lösung sind. So wird die Beckentiefe entscheidend von den Baugrund- und Grundwasserverhältnissen mitbestimmt.

Besonders hervorzuheben ist die Problematik des pH-Wertes (GUJER u. SCHWAGER 1990). Bei größerer Sauerstoffausnutzung, dh. geringerer erforderlicher Luftmenge bei gleichem Sauerstoffbedarf, steigt der Kohlendioxidgehalt in der Abluft. Entsprechend dem Henry'schem Gesetz (Verteilung eines Gases in der Flüssig- und Gasphase) muß auch die Konzentration des gelösten  $\text{CO}_2$  im Belebtschlammabwassergemisch größer sein. Außerdem steigt mit zunehmender Wassertiefe auch die Löslichkeit von Kohlendioxid. Dadurch wird:

- sich bei gegebener Säurekapazität in tiefen Becken ein geringerer pH-Wert einstellen als in flachen Becken, wodurch es zu einer Hemmung der Nitrifikation kommen kann.
- das Kalk- Kohlensäuregleichgewicht im Belebungsbecken so verschoben, daß Betonschäden auftreten können.

Bei der Auswahl des Systems ist also jedenfalls eine Gegenüberstellung der Varianten mit den entsprechenden Kosten anzuraten. So ist die Energieeinsparung bei der Belüftung durch günstigeren Sauerstofftrag dem Neutralisationsmittelbedarf (um ein Absinken des pH-Wertes zu verhindern) und den Kosten für höhere Betonqualität, bzw. den Kosten für Beschichtung des Betons gegenzurechnen. Ist eine Abluftbehandlung vorgesehen wird ein weiterer Kostenfaktor durch die Größe der Abluftbehandlungsanlage in die Entscheidung einzurechnen sein.

Ein Druckbelüftungssystem besteht im wesentlichen aus

- Belüfterelementen (Rohre, Dome, Platten, etc.)
- Luftverdichtern
- Antriebsmaschinen (Elektromotore, Verbrennungsmotore)
- Regel- und Meßeinrichtungen
- verbindenden Rohrleitungen und Armaturen.
- Mischeinrichtungen

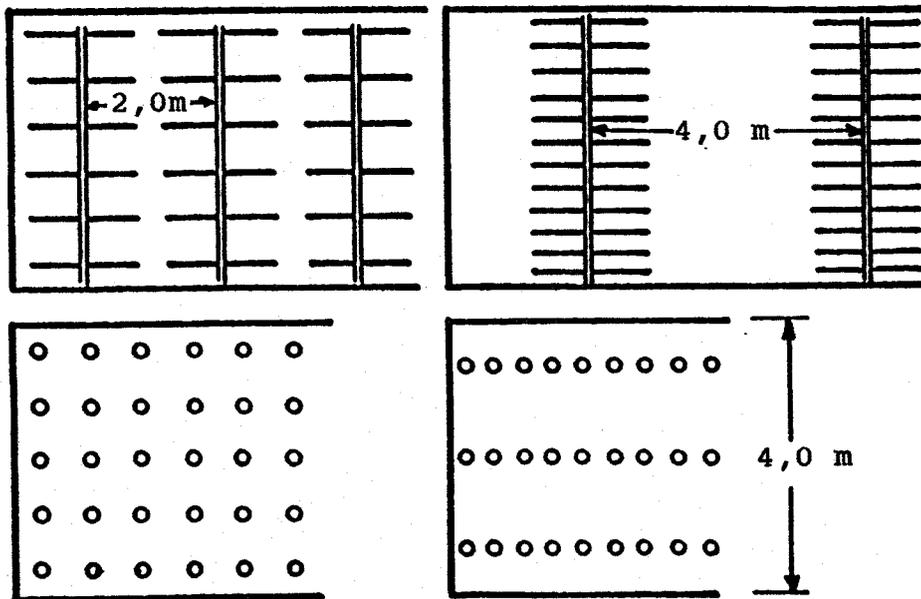
### 3.1.1 Belüfterelemente

Bei der Auswahl von Belüfterelementen ist neben der Eignung innerhalb der Verfahrenskonzeption, der Materialwahl und dem absoluten Druckverlust auch auf die Qualität der Verarbeitung zu achten. Auch bei minimaler Luftbeaufschlagung müssen alle Belüfter gleichmäßig abgasen (Qualitätskontrolle)! Die vom Hersteller angegebene Mindestbeaufschlagung ist gegebenenfalls durch Absperren von Belüftergruppen sicherzustellen. Das heute ausschließlich flächig angeordnete Belüfter eingesetzt werden steht außer Frage. Nach Untersuchungen von WAGNER (1991) wird bei 20-40% abgasender Belüfterfläche, bezogen auf die Beckenrundfläche, die maximale Sauerstoffausnutzung erreicht. Diese Belegungsichte erscheint hoch, z.B. für Tellerbelüfter ergibt sich ein Rastermaß von 30 cm! Aus Kostengründen versuchen die Ausrüsterfirmen eher unter dieser Belegungsichte zu bleiben und möglichst wenige, einfache Hauptverteiler zu installieren. Welche Anordnung aber

1a

noch als flächig anzusprechen ist, und wo der Einfluß auf den Sauerstofftrag merkbar wird, ist offen (KAYSER 1991). Jedenfalls sind die Belüfter in den belüfteten Bereichen so anzuordnen, daß eine Walzenbildung möglichst nicht erfolgt. Bei Plattenbelüftern konnten wir beobachten, daß, bei dichter Belegung, im Becken vorhandene Vouten eine beachtliche Walzenströmung erzeugt haben.

Abbildung 3: Beispiele für Belüfteranordnung



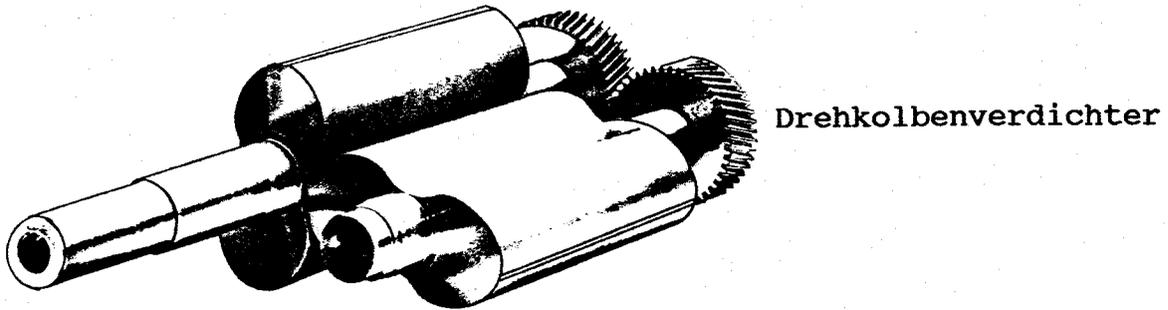
Die konstruktive Gestaltung der Becken und des Belüftungssystems muß eine einfache Reinigung der Beckensohle ermöglichen (Sohlneigung, Rinnen, etc.).

### 3.1.2 Luftverdichter

Als Luftverdichter kommen in der Abwassertechnik fast ausschließlich Drehkolbenverdichter, Schraubenverdichter und Strömungsverdichter zum Einsatz.

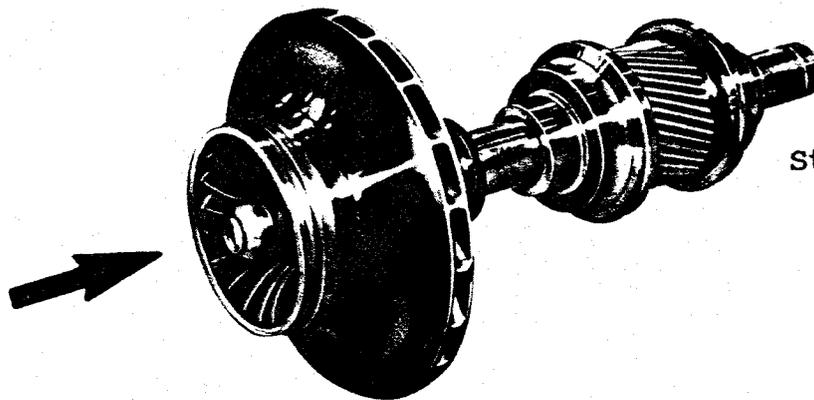
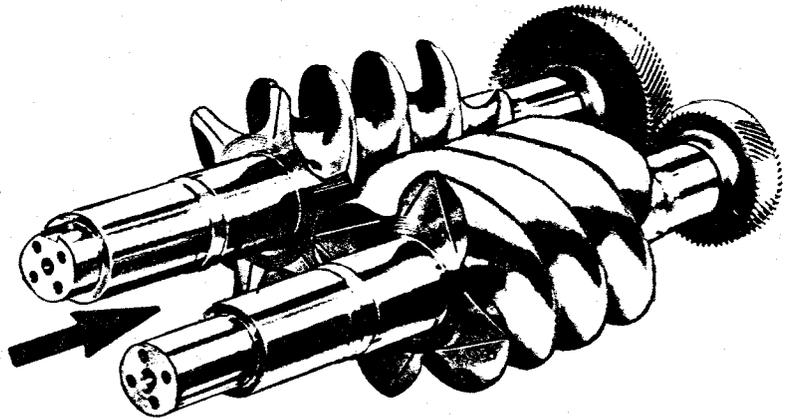
1a

Abbildung 4: Luftverdichter



Drehkolbenverdichter

Schraubenverdichter



Strömungsverdichter

Drehkolben- und Schraubenverdichter sind Zwangsverdichter die nach dem Verdrängungsprinzip arbeiten. Der Förderdruck wird hauptsächlich durch die bei der Verdichtung entstehende Wärme und damit durch die Temperatur begrenzt. Drehkolbenverdichter laufen normalerweise mit Drehzahlen von  $700-3500 \text{ min}^{-1}$  bei maximalen Druckdifferenzen von  $1,0 \text{ bar}$ , Schraubenverdichter werden dagegen mit  $5000-15000 \text{ min}^{-1}$  angetrieben und können bis  $3,5 \text{ bar}$  Druckdifferenz überwinden.

Strömungsverdichter arbeiten wie eine Kreiselpumpe aber mit wesentlich größerer Drehzahl (ca. 15.000-40.000 min<sup>-1</sup>). Sie kommen erst bei größeren Luftmengen (ab. ca. 5000 Nm<sup>3</sup>/h) zum Einsatz. Wesentlich bei der Auslegung von Strömungsverdichtern ist die Pumpgrenze (partielle Rückströmungen im Verdichterlaufrad bei zu großem Gegendruck). Dieser instationäre Zustand verursacht extreme Belastungen für das Aggregat und muß jedenfalls vermieden werden. Die heute angebotenen Turboverdichter haben alle serienmäßig eine Sicherheitseinrichtung die, wenn Pumpen auftritt, die Maschine abschaltet. Der Verdichtungswirkungsgrad liegt bei den Strömungsverdichtern mit bis zu 85% um 10-20% höher als bei den Kolbenverdichtern. Um die Verlust gering zu halten ist auch auf der Saugseite auf eine ausreichende Bemessung von Ansaugkanälen, eisfreie Ansaugregister und saubere Luftfilter zu achten.

### 3.1.3 Antriebsmaschinen

Als Antriebsmaschinen für Luftverdichter werden hauptsächlich Elektromotoren und Verbrennungsmotoren eingesetzt. Bei direkter Kopplung von Verbrennungsmotoren an Arbeitsmaschinen ist praktisch keine Drehzahlveränderung möglich. Diese Anordnung kommt daher nur für die "Grundlast" in Frage. Aufgrund der geringen Flexibilität und den Problemen der Schwingungsübertragung sollten bei Strömungsverdichtern prinzipiell nur Elektro-Antriebe verwendet werden. Innerhalb der E-Antriebe nimmt der Asynchron-Kurzschlußläufer eine herausragende Rolle ein.

### 3.1.4 Regel- und Meßeinrichtungen

Mit dem Begriff Regeleinrichtungen möchte ich im Rahmen dieses Vortrages die Drehzahlverstellmöglichkeiten der Verdichter, die Leitapparate der Strömungsverdichter und Stellglieder (z.B. Regelventile, Drosselklappen) aber auch die meßtechnischen Einrichtungen zusammenfassen. Die Änderung des Luftstromes kann durch die Anzahl der in Betrieb befindlichen Maschinensätze, bei den Drehkolben- und Schraubenver-

dichtern zusätzlich durch Drehzahlverstellung, und bei den Strömungsverdichtern durch einen Verstell-Diffusor hinter dem Laufrad und/oder ein Verstell-Leitrad vor dem Laufrad, erzielt werden. Der Verstellbereich ist bei den Drehkolben- und Schraubenverdichtern durch den Arbeitsbereich des Antriebes festgelegt. Bei den Radialverdichtern wird der Arbeitsbereich mit 45-100% angegeben.

Die Drehzahlverstellung bei Drehstromasynchronmotoren ist durch eine entsprechende Anzahl der Wicklungen (Polumschaltung) die Drehzahl veränderbar, die möglichen synchronen Drehzahlen berechnet man nach

$$\text{Drehzahl } [\text{min}^{-1}] = \frac{\text{Netzfrequenz } [\text{Hz}] \times 60}{\text{Polpaarzahl } [-]}$$

In der Regel sind 2 Drehzahlen üblich, aber auch drei ausführbar. Der Wirkungsgrad und das Anlaufdrehmoment ist bei polumschaltbaren Motoren kleiner (5% - 10%).

Bei der Drehzahlregelung mittels Frequenzumformern sind Drehzahlen von 30-100% einstellbar. Beim Einsatz von Frequenzumformern treten zusätzliche Verluste (im Motor und FU) bis zu 15% auf. Die Verlustenergie wird in Wärme umgesetzt und muß abtransportiert werden (Achtung bei Warteneinbau). Auch Rückwirkungen auf das Versorgungsnetz sind möglich und können Störungen hervorrufen. Neben der empfindlichen Reduktion des Anlaufmomentes stehen nur ca. 85% des Nennmomentes zur Verfügung, dh. der Antrieb ist gegebenenfalls größer auszulegen. Beim Betrieb mit niederen Drehzahlen reicht die Kühlwirkung nicht aus. E-Motoren die mit Frequenzumformern betrieben werden, sollten mit einer Überwachung der Wicklungstemperatur und Fremdlüftung ausgestattet sein. Noch eine Bemerkung zu den Kosten der Drehzahlverstellung. Ist für einen polumschaltbaren Motor mit einem Aufpreis von max.50% zu rechnen so muß man für einen Frequenzumformer etwa den Preis des Antriebes also 100% hinzurechnen. Vom planenden Ingenieur ist daher die wirklich erforderliche Abstufung im Hinblick auf die Regelstrategie

zu ermitteln. Danach sind die Verdichter bzw. Oberflächenbelüfter mit entsprechenden Antrieben und Drehzahlverstellung auszurüsten. Häufig wird es genügen einige wenige Aggregate mit polumschaltbaren Antrieben oder Frequenzumformern auszuführen.

Da in unseren Breiten die Ansaugtemperaturen durchaus um 50°C variieren ist für Strömungsverdichter eine kombinierte Verstell-Leitrad und Verstell-Diffusor Regelung zu empfehlen; nur so ist gewährleistet, daß im aktuellen Betriebspunkt (festgelegt durch Ansaugtemperatur, Ansaugluftdruck und Förderdruck) mit optimalem Wirkungsgrad gearbeitet wird. Weitere Informationen können dem ATV Hinweis H265 und dem 2. Arbeitsbericht des Fachausschusses 2.13 "Automatisierung von Kläranlagen" entnommen werden.

Wenn zwar beide Leitapparate vorhanden sind aber der zugehörige Optimierungsrechner fehlt, kann man sich wie folgt helfen: Man stellt zunächst mittels Verstell-Diffusor (hinter dem Laufrad) die gewünschte Luftmenge ein und verändert dann die Stellung des Leitrades vor dem Laufrad so, daß die Stromaufnahme ein Minimum wird. Falls sich die Luftmenge zu stark verändert hat ist der obige Vorgang solange zu wiederholen bis ein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht ist.

Auf mittleren/kleinen Anlagen werden häufig einzelne bzw. mehrere Verdichter einzelnen Beckengruppen zugeordnet. Die Veränderung der Luftmenge wird durch die Anzahl der Maschinensätze und Drehzahlveränderung (Polumschaltung, Frequenzumformer) realisiert. Auf großen Anlagen arbeiten oftmals alle Verdichter (auch sehr große Einzelaggregate sind dann möglich) auf ein zentrales Luftverteilsystem, in dem der Druck konstant gehalten wird (Konstantdruckregelung). Der Luftstrom in die einzelnen Becken wird mittels Regelklappen verändert. Durch die Entkoppelung der Verdichter von der Luftmengenregelung wird eine geringere Schalthäufigkeit der Verdichter erreicht, aber es treten zusätzliche Drosselver-

luste bei den einzelnen Luftabgängen auf.

Bei der Auswahl der Meßeinrichtungen zur Luftmengenmessung ist auf den Meßbereich und den Druckverlust zu achten. Eine technisch sehr gute Lösung sind Turbinenradzähler, sie haben geringen Druckverlust und sind genau, leider sind sie nur für relativ kleine Volumenströme erhältlich und auch teuer. Nach unserer Erfahrung sind Meßblenden und Venturirohre nach DIN 1952 immer noch eine sehr vernünftige Wahl. Bei der Ausführung des Meßumformers ist jedenfalls auf kurze, entwässerbare und frostsichere Verlegung (Begleitheizung) der Druckentnahmen zu achten!

### 3.1.5 Rohrleitungen

Die verbindenden Rohrleitungen sind auf kritische Frequenzen bei unterschiedlichen Luftdurchsätzen zu untersuchen. Schrill pfeifende Rohrleitungssysteme gibt es schon genug. Die Materialwahl ist so zu treffen, daß eine Langzeitbeständigkeit gegen die auftretenden Temperaturen ( $>100^{\circ}\text{C}$ ) und Sonneneinstrahlung gegeben ist. Lange gerade Rohrstrecken sollten immer ein Gefälle zu einem Kondensatablaß haben. Tiefpunkte sind jedenfalls mit einem Kondensatablaß auszurüsten. Die Leitungen sind am Beckenrand so hoch zu führen, daß bei Druckschwankungen (Abblasen einer Anfahrentlastung; falscher elektrischer Anschluß) im Druckluftsystem jedenfalls ein Hebereffekt vermieden wird. Die eingesetzten Rückschlagklappen müssen in ihrem Durchmesser dem Rohrleitungssystem angepaßt sein um zusätzliche Druckverluste zu vermeiden. Die Anschlußverrohrung im Belebungsbecken muß so beschaffen sein, daß beim Anfahren der Gebläse das eingedrungene Wasser ungehindert ausströmen kann. Die Entwässerungsleitungen sind mit der gleichen Sorgfalt auszuführen wie die Anschlußleitungen für die Belüfter, da bei einem Defekt der Entwässerungsleitung die selben Maßnahmen erforderlich sind wie bei einem Bruch am Luftverteilsystem (Beckenleerung!). Beim Einsatz einer Drosselregelung ist ein möglichst linea-

res Stellverhalten der Ventile bzw. Schieber anzustreben.

### 3.1.6 Mischeinrichtungen

Mischeinrichtungen werden immer häufiger eingesetzt, da einerseits Anlagen mit immer geringerer Schlammbelastung (geringerer Sauerstoffverbrauch-geringere Luftzufuhr) gebaut werden und die Verfahren der Bio-P und Denitrifikation unbelüftete Zonen erfordern. Die in Belebungsbecken eingesetzten Rührwerke kann man grob in solche mit horizontaler und vertikaler Welle sowie in schnell und langsam laufende unterteilen. Mischeinrichtungen die selbst Bestandteil des Belüftungssystems sind, Treibwasserstrahlen bei Düsenbelüftern oder Mischkegel beim OKI, werden nicht gesondert behandelt. Der spezifische Energieaufwand, um Ablagerungen zu vermeiden, beträgt je nach Beckenausbildung und Rühreinrichtung  $1,5-5 \text{ W/m}^3$ . Das Zusammenwirken von Belüftungssystem und Mischeinrichtungen ist weitgehend unbekannt und im Einzelfall sehr stark von der Beckengeometrie und der Leistungsdichte abhängig. Durch die überlagerte Strömung werden die Blasen aus dem Einschnürungsbereich des Belüfters weggespült. Dadurch wird die Ausbildung von Walzenströmungen behindert und die Blasen steigen langsamer auf. Der Effekt ist ein größerer Sauerstoffübergang. Bei eigenen Messungen haben wir in einem Umlaufbecken, das nur auf einer Langseite mit Belüftern ausgerüstet war, mit steigender Umwälzleistung auch bessere Sauerstoffträge ermittelt. Bei Umlaufbecken empfehlen sich Rührwerke mit horizontaler Achse und bei Becken mit quadratischem oder rundem Grundriß solche mit vertikaler Achse.

### 3.2 Kriterien für Oberflächenbelüftungssystemen

Komponenten von Oberflächenbelüftern sind

- der Rotor oder Kreisel
- das Getriebe
- der Antriebsmotor (praktisch immer Elektromotore)
- die Regeleinrichtung
- und die Mischeinrichtungen.

### 3.2.1 Rotoren und Kreisel

Stabwalzenbelüfter werden heute ausschließlich als sogenannte Mammutrotoren mit 1 Meter Durchmesser angeboten. Eine neue Entwicklung sind Rotorsterne aus Kunststoff (geringerer Verschleiß, keine Korrosionsprobleme). Die Umfangsgeschwindigkeit liegt normalerweise zwischen 3 und 4 m/s.

Kreiselbelüfter sind, anders wie Stabwalzenbelüfter die nur mit 1 Meter Durchmesser angeboten werden, in verschiedenster konstruktiver Ausbildung auf dem Markt. Man unterscheidet im wesentlichen zwischen offener und geschlossener Bauweise. Kreisel werden mit Durchmessern bis ca. 4 m angeboten. Die Umfangsgeschwindigkeit liegt zwischen 4 und 6 m/s.

Ein beherrschbares aber dennoch nicht zu unterschätzendes Problem ist die Aufschaukelung von Wellen durch Oberflächenbelüfter. Dadurch kommt es zu extremen Beanspruchungen von Getriebe und Antriebsmotor. Die günstigste Anordnung von Leitwänden bzw. Bremskreuzen kann oft erst nach einem Versuch festgelegt werden.

Um bei Rotorbelüftern gute Sauerstoffzufuhr und Durchmischung zu erreichen, sind Brems- und Leitwände vor bzw. hinter dem Rotor anzuordnen. Diese bremsen die Wasserströmung und lenken das mit Sauerstoff angereicherte Belebtschlammabwassergemisch in die Tiefe. Die auftretenden Lärm-, Geruch- und Aerosol-Emissionen lassen sich durch einfache Maßnahmen wie Verbreiterung der Betonbrücken, Schalldämmung der Antriebe und durch Aerosolsperren weitgehend vermeiden.

### 3.2.1 Getriebe

Die Qualität eines Oberflächenbelüfters wird entscheidend von der Getriebequalität bestimmt, hier darf keinesfalls gespart werden. Die Sicherheiten müssen wesentlich größer als für üblichen Industrieinsatz gewählt werden.

### 3.2.2 Antriebe

Hier kommen fast ausschließlich Asynchronmaschinen zum Einsatz.

### 3.2.3 Regeleinrichtungen

Die Regelung der Sauerstoffzufuhr erfolgt bei Oberflächenbelüftern durch:

- die Anzahl der in Betrieb befindlichen Maschinen,
- die Drehzahl und
- die Eintauchtiefe.

Ein wichtiger Punkt im Vergleich zur Druckbelüftung ist die Tatsache, daß der Sauerstoffeintrag praktisch von 0-100% variiert werden kann.

Die Möglichkeiten der Drehzahlveränderung wurden schon im Kapitel Druckbelüftung behandelt. Die Änderung der Eintauchtiefe kann durch Ablaufwehre und Höhenverstellung des Belüfters selbst erreicht werden. Stark schwankende Zulaufmengen und zu gering bemessene Wehrbreiten verursachen häufig eine Überlastung der Antriebe durch unzulässig hohen Wasserspiegel. Da die tatsächliche Wassermenge in der Planungsphase oft nicht genau bekannt ist wird die Eintauchtiefe häufig nur zur Grobeinstellung genutzt und die Regelung über die Drehzahl vorgenommen. Eine zusätzliche Höhenverstelleinrichtung der Oberflächenbelüfter selbst könnte hier Abhilfe schaffen, wird aber aus Kostengründen nur selten ausgeführt. Die Verstellgeschwindigkeit der Wehre muß so klein bemessen sein, daß Rückwirkungen auf das Nachklärbecken gering bleiben. Von einer gleichzeitigen Wehr- und Drehzahlregelung sollte aus hydraulischen Gründen Abstand genommen werden.

Für einige Kreiseltypen wurde von v.d.EMDE (1968) folgender Zusammenhang für die Sauerstoffzufuhr OC angegeben:

$$OC \approx f(\text{Geometrie, } E_t) \cdot n^3 \cdot d^5$$

n ... Kreiseldrehzahl

d ... Kreiseldurchmesser

$E_t$  ... Eintauchtiefe

(Achtung auf unterschiedliche Definitionen)

Da der Kreiseldurchmesser bei der Planung einmal festgelegt wird, bietet sich für die Regelung im Betrieb vorzugsweise die Drehzahl an. Bei polumschaltbarer Ausführung ist auf das Drehzahlverhältnis zu achten, da bei einer Reduktion der Drehzahl auf die Hälfte nur mehr ein Achtel des Sauerstoffes eingetragen wird. Als zweckmäßig hat sich eine Drehzahlabstufung von 3:4 erwiesen. In einer Ähnlichkeitstheoretischen Analyse von ZLOKARNIK (1979) wird gezeigt, daß der Stofftransport bei Kreiselbelüftern wesentlich von der Froude-Zahl abhängt. Die Auswertung umfangreichen Datenmaterials liefert die Aussage, daß der Sauerstoffenertrag  $O_p$  mit steigender Leistungsdichte zunimmt:

$$O_p \approx f(\text{Geometrie}) \cdot (P/V)^k$$

P ... Leistung

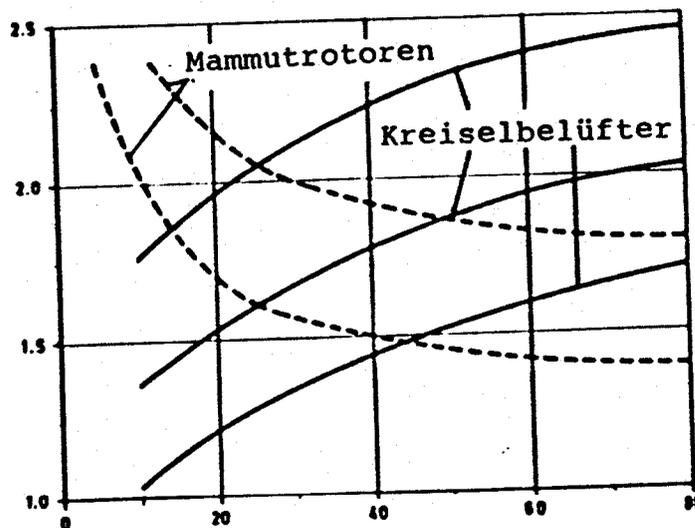
V ... Belebungsbeckenvolumen

k ... kreiseltypenabhängiger Exponent (0,1-0,2)

Dieses Ergebnis ist gleichzeitig der wesentlichste Unterschied zwischen Kreisel und Rotorbelüftern, da bei Stabwalzen mit steigender Leistungsdichte die Wirtschaftlichkeit abnimmt.

Abbildung 5: Leistungscharakteristik

SAUERSTOFFERTRAG  
kgO<sub>2</sub>/kWh

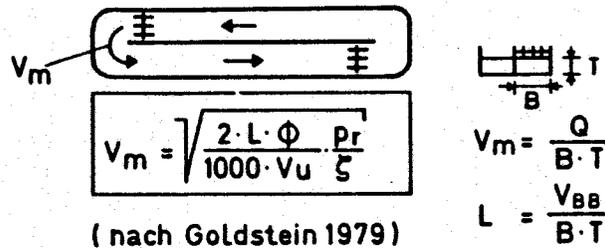


LEISTUNGSDICHTE IM BELÜFTUNGSBECKEN W/m<sup>3</sup>

3.2.4 Mischeinrichtungen

**Mischeinrichtungen** sind im Normalfall für Oberflächenbelüfter nicht erforderlich. Bei ungünstigen Nährstoffverhältnissen bzw. hohen Anforderungen an die Denitrifikation sind aber auch hier Rührwerke zu installieren. Zur Abschätzung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in Umlaufbecken kann die Arbeit von GOLDSTEIN (1979) in der Formulierung von v.d.EMDE (1980) verwendet werden:

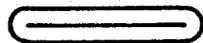
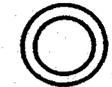
Abbildung 6: Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeit



Beiwert  $\phi$  - 0,3 (für  $V = 0,25 \div 0,4$  m/s)

Umfangsgeschwindigkeit  $v_u = 3,77$  m/s

Verlustbeiwert  $\zeta$ :

-  ohne Einbauten - 2,5
  -  ohne Einbauten - 0,5
  -  2,5+3m | Leitwand (0,6m) - 0,5
  -  1 Bremswand (0,6m) - 0,8
- Energiedichte  $p_r$  ( $W/m^3$ )

3.3 Vergleich von Druck- und Oberflächenbelüftungssystemen

Wenn es das "beste Belüftungssystem" gäbe, dann wäre nach kurzer Zeit nur mehr dieses auf dem Markt. Die Vielfalt der angebotenen Systeme belegt anschaulich, daß jedes System Vor- und Nachteile hat. Je nach Anwendungsfall sind die Stärken des Einen oder die Schwächen des Anderen für die Wahl entscheidend. Vergleicht man nun Oberflächen- und Druck-

luftsyste me so ergibt sich folgendes Bild (KROISS 1991):

### 3.3.1 Nachteile Oberflächenbelüfter

- Die Beckentiefe bei Oberflächenbelüftern ist mit ca. 4 m begrenzt und auch die Wahl der Beckenform ist eingeschränkt.
- Wegen der geringen Beckentiefe haben die Becken eine größere Oberfläche, wodurch die Abluftfassung schwierig ist. Auch die Ausbildung von Aerosolen ist eindeutig größer als bei Druckluftsystemen, jedoch ist dieses Problem technisch beherrschbar.
- Durch die im Freien stehenden Aggregate ergibt sich ein Lärmproblem (Antrieb, Wassergeraus ch), das schwieriger zu beherrschen ist als bei Druckluftsystemen.
- Die Wirtschaftlichkeit von Oberflächenbelüftern ist in Reinwasser meist wesentlich schlechter als bei Druckluft. Unter Betriebsbedingungen ist dieser Unterschied jedoch deutlich geringer.

### 3.3.2 Nachteile Druckbelüfter

- Bei Defekten an Belüftern oder Rohrsystem ist das Becken zu entleeren. Die Reinigung ist durch die Einbauten an der Beckensohle etwas aufwendiger.
- Gerüche werden leichter ausgetragen als bei Oberflächenbelüftern.
- Die Verstopfungsanfälligkeit und Alterung, speziell von Gummi- bzw. Membranbelüftern, ist schwer abschätzbar. Gerade bei Industrieanlagen werden von den Herstellern kaum Garantien abgegeben (und selbst wenn, wer kann schon beweisen, daß sich die Abwasserbeschaffenheit seit der Angebotlegung nicht verändert hat?!)
- Bei sehr guter Sauerstoffausnutzung und niedriger Säurekapazität des Abwassers wird Neutralisationsmittel benötigt um den pH-Wert hochzuhalten. Bei ungünstigen Verhältnissen ist eventuell eine höhere Betonqualität oder eine Beschichtung erforderlich.

- Der regelungstechnische Aufwand ist, speziell bei großen Anlagen, größer als bei Oberflächenbelüftern. So sind bei einer Konstantdruckregelung zwei getrennte Regelkreise und in jeder Luftleitung ein Automatikschieber (z.B. Blenden-schieber) erforderlich.

### 3.3.3 Vorteile Oberflächenbelüfter

- Oberflächenbelüfter sind einfache robuste und erprobte Aggregate.
- Sie sind praktisch verstopfungsfrei, was bei Anlagen ohne Vorklärung und bei Gefahr von Ausfällungen große Bedeutung hat.
- Es sind keine Einbauten an der Beckensohle, so daß die Leerung und Reinigung der Becken bei Außerbetriebnahme sehr einfach ist.
- Reparaturen an den Geräten können ohne Beckenleerung durchgeführt werden. D.h., daß keine langen Außerbetriebnahmen zu Reparaturzwecken erforderlich sind.
- Durch die große Anzahl von Aggregaten ist eine hohe Betriebssicherheit gegeben. Außerdem wird die Regelbarkeit über einen großen Bereich der Sauerstoffzufuhr ermöglicht und deutlich vereinfacht, was sich günstig auf den Energieverbrauch auswirkt.

### 3.3.4 Vorteile Druckbelüfter

- Es sind Beckentiefen  $> 5$  m möglich und für manche Systeme sogar notwendig. Jede beliebige Beckenform ist möglich.
- Bei großer Beckentiefe ist der Platzbedarf gering, was speziell für Industrieanlagen manchmal wichtig sein kann. Die Abdeckung der Becken ist einfacher.
- Es werden weniger Aerosole gebildet und die Lärmbelastung ist durch zentrale Gebläsestationen leicht beherrschbar.
- Der Sauerstofftrag in Reinwasser ist deutlich größer als bei Oberflächenbelüftern. Durch empfindlich geringere  $\alpha$ -Werte schrumpft die Differenz unter Betriebsbedingungen aber wieder erheblich.

#### 4. ARBEITSBEREICHE VON BELÜFTUNGSSYSTEMEN

Für die Funktion der Anlage ist die Abstimmung des Lieferkennfeldes der Belüftungseinrichtung und der Bedarfskennlinie der Anlage (minimale und maximale Sauerstoffzufuhr bei verschiedensten Betriebszuständen) entscheidend. Hier muß eine enge Zusammenarbeit mit der meß- und regeltechnischen Planung erfolgen.

Den Arbeitsbereich eines Belüftungssystems erhält man aus dem Lieferkennfeld und der Bedarfskennlinie unter Berücksichtigung kritischer Anlagenzustände, kritische Aggregatzustände und sonstiger Anforderungen. Daraus lassen sich folgende Randbedingungen ableiten:

- zulässige Absenkgeschwindigkeit von Wehren
- minimale Mischenergie
- Verstellbereich der Arbeitsmaschine
- Pumpgrenze bei Turboverdichtern
- Maximaltemperatur bei Verdrängungsverdichtern
- Spitzenlastbegrenzung
- zulässige Schalthäufigkeit der Antriebe
- wirtschaftlicher Betrieb der Belüfter

Die Lieferkennlinien von Druckbelüftungssystemen erhält man aus der Kombination der Verdichterkurven mit den Sauerstoffeintragskurven der entsprechenden Belüfterelemente. Für Oberflächenbelüfter sind die Lieferkennlinien direkt verfügbar.

Aus Gründen der Flexibilität und Redundanz sind immer mehrere Verdichter vorhanden. Neben der Größenabstufung der Aggregate untereinander ist auf die Möglichkeit nach gleichmäßiger Verteilung der Grundlast (gleiche Betriebsstunden gleicher Verdichter) zu achten. Auch bei Oberflächenbelüftern ist die Einschaltfolge der Belüfter, in den Grenzen der Anlagenkonzeption (örtliche Anordnung Zu- und Ablauf), flexibel zu gestalten. Dadurch soll vermieden werden, daß immer

1a

die selben Belüfter laufen und andere einrosten!

Abbildung 7: Lieferkennfeld Strömungsverdichter

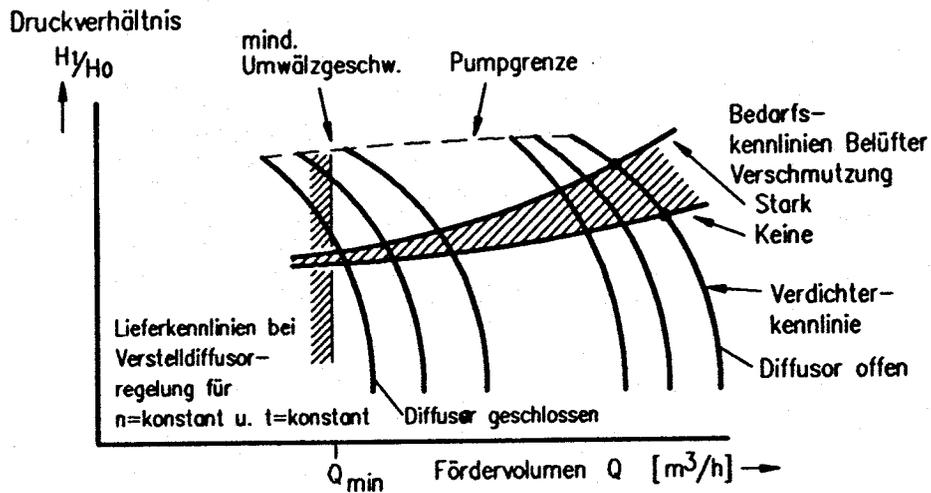
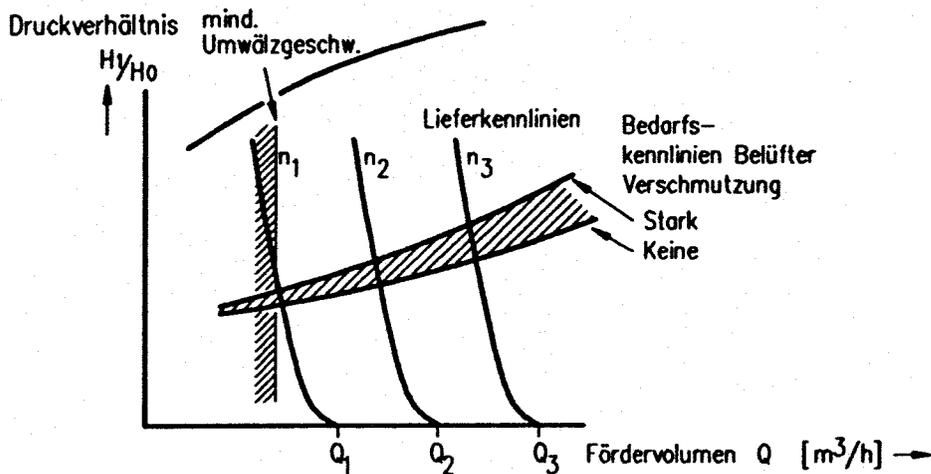
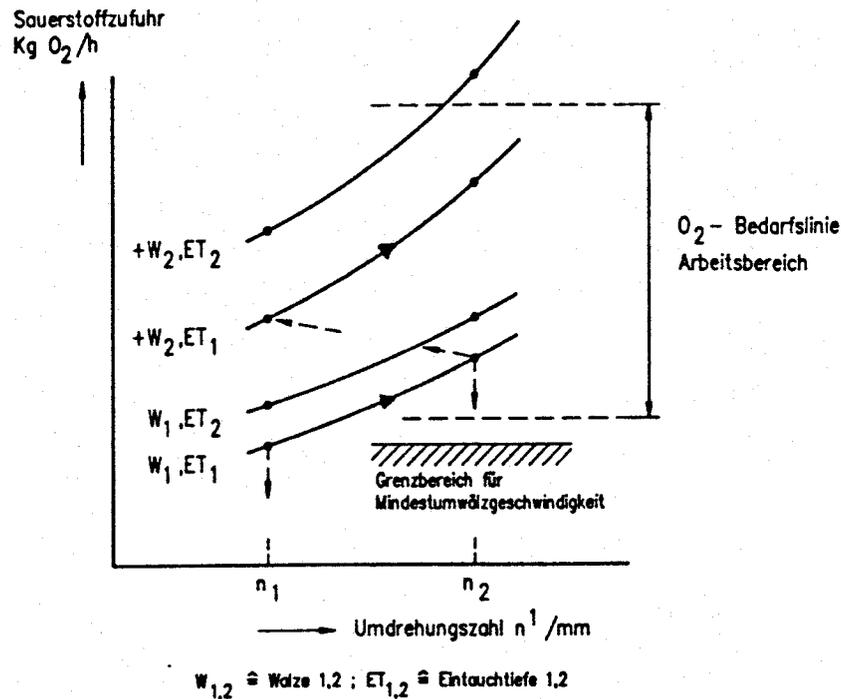


Abbildung 8: Lieferkennfeld Verdrängungsverdichter



Am Beispiel eines Oberflächenbelüfters soll die Ermittlung des tatsächlichen Arbeitsbereiches dargestellt werden.

Abbildung 9: Arbeitsbereich am Beispiel Oberflächenbelüfter



## 6. AUSWAHLKRITERIEN UND EINSATZBEREICHE FÜR BELÜFTUNGSSYSTEME

Bereits bei der Ausarbeitung des Verfahrenskonzeptes der Abwasserreinigungsanlage 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, so daß hier Änderungen vorgenommen werden müssen, bis eine Übereinstimmung hergestellt ist.

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 Sauerstoffeintragswerte und eine bestimmte Verteilung des Sauerstoffs im Belebungsbecken als auch Umwälz- und Mischverhältnisse.

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

Die Wahl der Beckentiefe hat eine wesentliche Rückwirkung auf das einzusetzende Belüftungssystem. Der wirtschaftlich optimale Bereich von Oberflächenbelüftern liegt bei 2 - 4 m, wogegen bei Druckbelüftern die doppelten Beckentiefen üblich sind. 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. Untergrundverhältnisse wie die Bodenart, Höhe des Grundwasserspiegels und des Hochwasserspiegels beeinflussen maßgeblich die zu wählende Beckentiefe. Aber auch Überlegungen zur  $\text{CO}_2$ -Löslichkeit und pH-Wert beeinflussen die Wahl der Wassertiefe.

Aus energetischer Sicht ist der Sauerstoffenertrag in  $\text{kgO}_2/\text{kWh}$  ein Vergleichswert für die Wahl des Belüftungssystems. Daneben ist jedoch die Sauerstoffzufuhr in  $\text{kgO}_2/\text{h}$  ein sehr wesentlicher Wert. Das vorgesehene Belüftersystem muß in jedem Fall unter Berücksichtigung der Abwassereigenschaften, der

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

Die Wahl der Beckentiefe hat eine wesentliche Rückwirkung auf das einzusetzende Belüftungssystem. Der wirtschaftlich optimale Bereich von Oberflächenbelüftern liegt bei 2 - 4 m, wogegen bei Druckbelüftern die doppelten Beckentiefen üblich sind. 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. Untergrundverhältnisse wie die Bodenart, Höhe des Grundwasserspiegels und des Hochwasserspiegels beeinflussen maßgeblich die zu wählende Beckentiefe. Aber auch Überlegungen zur  $\text{CO}_2$ -Löslichkeit und pH-Wert beeinflussen die Wahl der Wassertiefe.

Aus energetischer Sicht ist der Sauerstoffenertrag in  $\text{kgO}_2/\text{kWh}$  ein Vergleichswert für die Wahl des Belüftungssystems. Daneben ist jedoch die Sauerstoffzufuhr in  $\text{kgO}_2/\text{h}$  ein sehr wesentlicher Wert. Das vorgesehene Belüftersystem muß in jedem Fall unter Berücksichtigung der Abwassereigenschaften, der

Einsatzart und der Betriebsweise den gestellten Anforderungen an die Sauerstoffzufuhr und Abwasserumwälzung genügen.

Für die Wahl des Belüftersystemes sind die zu erwartenden Betriebsverhältnisse und der erforderliche Regelbereich zu ermitteln. Es ist dann zu prüfen, welches Belüftungssystem unter diesen Verhältnissen günstige Sauerstoffertragswerte erbringt.

Hervorzuheben ist, daß durch die Wahl des Belüftungssystems kein Einfluß auf die Belebungsbeckentemperatur gegeben ist!

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. Ferner muß die Beständigkeit gegen mechanische und chemische Angriffe 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 Sauerstoffertrag. Betriebssicherheit muß besonders auf kleineren Kläranlagen und Anlagen wo kein geschultes Personal zur Verfügung steht daher Vorrang haben.

Wichtig ist, daß der Sauerstoffertrag bei einer Reihe von Belüftungssystemen keine konstante Größe ist, sondern von der Energiedichte abhängt. Die Energiedichte wird von der Auslastung der Anlage beeinflusst, aber auch von den täglichen und

saisonbedingten Schwankungen der Sauerstoffzufuhr. Bei Vergleichen ist daher die Wirtschaftlichkeit des Systems bei dieser oft nur 50% betragenden Auslastung heranzuziehen. Im Hinblick auf den Standort der Kläranlage und die Sensibilisierung der Bevölkerung ist bei der Wahl der Belüfter zu berücksichtigen, daß durch geeignete Maßnahmen Aerosol-, Lärm- und Geruchsemissionen so gering als möglich gehalten werden.

Ein echter Kostenvergleich verschiedener Belüftungssysteme ist nur über die Jahreskosten (Kapitalkosten und Betriebskosten) der gesamten Abwasserreinigungsanlage möglich. Nur die Unterschiedlichen Anschaffungskosten und die Energiekosten der Belüftungssysteme gegenüberzustellen genügt nicht. Vielmehr sind alle Folgekosten bzw. Einsparungen die sich aus der Regelungsmöglichkeit, Wartung, Reparatur, etc. ergeben auch einzurechnen.

## 7. ZUSAMMENFASSUNG

Ausgehend von der Zielsetzung der Abwasserreinigung wurden die Anforderungen an das Belüftungssystem formuliert. Das resultierende Anforderungsprofil wird auf die zwei Hauptvertreter, Druck- und Oberflächenbelüftungssysteme, umgelegt. Neben den allgemeinen Kriterien bei der Bemessung von Belüftungssystemen wird besonders auf die Punkte der Durchmischung und des Einflusses des Belüftungssystems auf die Belebungsbeckentemperatur eingegangen. An zwei ausgeführten Anlagen mit unterschiedlicher Belüftung wird der Temperatureinfluß des Belüftungssystems veranschaulicht. An Hand der Komponenten von Oberflächen- und Druckbelüftungssystemen werden Hinweise zur Bemessung und Auswahl gegeben. Eine Zusammenstellung der Vor- und Nachteile für Druck- und Oberflächenbelüfter sowie einige Bemerkungen über Einsatzbereiche und Auswahlkriterien bildet den Schluß.

**8. LITERATUR**

- ATV - Fachausschüsse 2.5 und 2.6: Arbeitsblatt A131 "Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen ab 5000 Einwohnerwerten"
- v.d.EMDE W.: Belüftungssysteme und Beckenformen, Münchner Beiträge, Bd.5 (1968)
- v.d.EMDE W.: Die Kläranlage Wien-Blumental, Österr.Wasserwirtschaft, Heft1/2, (1971)
- v.d.EMDE W.: Entscheidungskriterien bei der Wahl von Belüftungssystemen, IAWPR-Sonderkonferenz, Amsterdam, Progress in Water-Technology, Vol.II, Nr.3 (1979)
- v.d.EMDE W.: Untersuchungen über Energieeinsparungen beim Belebungsverfahren, Berichte aus Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, TU München, Nr.28 (1980), S.253-276
- FREY W.: Belüftungssysteme, Fortbildungskurs Biologische Abwasserreinigung (1990), Wiener Mitteilungen Bd. 81.2
- FREY W.: Sauerstoffbedarf und Sauerstoffzufuhr bei Belebungsanlagen, ATV-Seminar 24/92, COM-Centrum Dresden (1992)
- GOLDSTEIN M.: Hydraulic losses in biological reactors with circulating flows, Prog.Wat.Tech. 12/5 (1980), S.565-592, Pergamon Press
- HAHN H., NEIS U.: Belastungsschwankungen auf Kläranlagen: Auswirkungen und Möglichkeiten der Reduktion, Schriftenreihe des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe, Band 41, (1985)
- KNOP E., KALBSKOPF K.-H.: Energetische und hydraulische Untersuchungen an mechanischen Belüftungssystemen; Gas-Wasserfach 110, S.198-201 und 266-269, (1969)
- KAYSER R.: Voraussetzungen für die Durchführbarkeit von Sauerstoffeintragsmessungen im Betrieb; Veröff.Inst.f. Stadtbauwesen, TU Braunschweig, Heft 50, (1991)
- KROISS H.: Perspektiven der Anwendung von Oberflächenbelüftern, Schriftenreihe WAR der TH Darmstadt, Band 54, (1991)

- MAIR J.: Einfahr- und Betriebsverhalten einer Belebungsanlage zur Reinigung von Zuckerfabriksabwasser", Diplomarbeit am Institut für Wassergüte, TU Wien, (1985)
- PÖPEL H.J., WAGNER M.: Leistung und Bemessung von Belüftungseinrichtungen, ATV-Fortbildungskurs G/2, (1991)
- RIEGLER G., CAPITAIN P.: Zusätzliche Umwälzung bei geringer Belüftungsdichte und Denitrifikation, Schriftenreihe WAR der TH Darmstadt, Band 37, (1989)
- SCHWAGER A., GUJER W.: pH Berechnung beim Belebtschlammverfahren und Auswirkungen des pH Wertes auf die Nitrifikation, EAWAG Verbandsbericht 348, VSA-Tagung 8.5.1987
- SVARDAL K., NOWAK O.: Bemessungsansätze, Anpassung von Kläranlagen an den Stand der Technik, Wiener Mitteilungen Bd.:100, (1992)
- WAGNER M.: Einfluß oberflächenaktiver Substanzen auf Stoffaustauschmechanismen und Sauerstoffeintrag, Schriftenreihe WAR der TH Darmstadt, Band 53, (1991)
- ZLOKARNIK M.: Advances in Biochem. Engng. Vol.11 (1979), S.157-180

FREY Wilhelm Dipl.Ing.  
Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft  
Technische Universität Wien  
Karlsplatz 13  
A-1040 Wien