

# **WIENER MITTEILUNGEN**

**WASSER • ABWASSER • GEWÄSSER**

**Band 134**

**Ein Beitrag zur Charakterisierung  
von Belüftungssystemen  
für die biologische Abwasserreinigung  
nach dem Belebungsverfahren  
mit Sauerstoffzufuhrmessungen**

Wilhelm Frey

Herausgeber  
Prof. Dipl.Ing. Dr. H. Kroiß  
Technische Universität Wien  
Institut für Wassergüte  
und Abfallwirtschaft

# **WIENER MITTEILUNGEN**

**WASSER • ABWASSER • GEWÄSSER**

**Band 134**

**Ein Beitrag zur Charakterisierung  
von Belüftungssystemen  
für die biologische Abwasserreinigung  
nach dem Belebungsverfahren  
mit Sauerstoffzufuhrmessungen**

**Wilhelm Frey**

Herausgeber  
Prof. Dipl.Ing. Dr. H. Kroiß  
Technische Universität Wien  
Institut für Wassergüte  
und Abfallwirtschaft

Dissertationsschrift zur Erlangung des akademischen Titels  
eines Doktors der technischen Wissenschaften  
an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen



Institut für Wassergüte  
und Abfallwirtschaft  
TU- Wien

Karlsplatz 13 / 226  
1040 Wien

Alle Rechte vorbehalten.  
Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es nicht gestattet,  
das Buch oder Teile daraus zu veröffentlichen

Druck: Riegelnik  
1080, Piaristengasse 19

ISBN 3 - 85234 - 025 - 9

## INHALTSVERZEICHNIS

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN .....	III
VERZEICHNIS DER TABELLEN .....	VII
VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN .....	VIII
KURZFASSUNG .....	XI
<b>1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG.....</b>	<b>1</b>
<b>2. STOFFTRANSPORT .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Mischcharakteristik von Reaktoren.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2 Reaktor „Belebungsbecken“ .....</b>	<b>6</b>
<b>2.3 Einflüsse auf den Stofftransport .....</b>	<b>7</b>
2.3.1 Hydrodynamik von Gasblasen und Blasenschwärmen .....	8
2.3.2 Variable Blasengröße .....	9
2.3.3 Stoffsystem .....	9
<b>3. VERSUCHSTECHNIK.....</b>	<b>11</b>
<b>3.1 Experimentelle Methoden .....</b>	<b>12</b>
<b>3.2 Auswerteverfahren .....</b>	<b>13</b>
<b>3.3 Sauerstoffzufuhr und Sauerstoffertrag.....</b>	<b>14</b>
3.3.1 Umrechnung.....	16
<b>4. EINFLUSSFAKTOREN AUF DAS MESSERGEBNIS.....</b>	<b>18</b>
<b>4.1 Versuchsabwicklung.....</b>	<b>18</b>
4.1.1 Vorbereitungen .....	18
4.1.2 Luftmengenmessung .....	19
4.1.3 Leistungsmessung.....	19
4.1.4 Wasserqualität .....	21
4.1.5 Chemikalieneinbringung .....	21

<b>4.2 Maschinelle Ausrüstung .....</b>	<b>24</b>
4.2.1 Arbeitsmaschinen.....	24
4.2.2 Wirtschaftlichkeit des Belüftungssystemes in Abhängigkeit des Betriebspunktes der Antriebsmaschinen .....	24
<b>4.3 Fallbeispiele über die Konsequenzen aus Sauerstoff     zufuhrmessungen .....</b>	<b>25</b>
<b>4.4 Erfahrungen mit Messungen in Belebtschlamm .....</b>	<b>26</b>
<b>5. VERFAHRENSTECHNISCHE AUSWERTUNG.....</b>	<b>28</b>
<b>5.1 Sauerstoffpartialdruck im Gas und Sauerstoffgehalt der         Flüssigphase in Abhängigkeit von der Wassertiefe .....</b>	<b>28</b>
<b>5.2 Berechnung des variablen Sättigungswertes <math>c_{s,t}</math> zum         Zeitpunkt <math>t=0</math>, und des „wahren <math>k_{La}</math>“ .....</b>	<b>31</b>
5.2.1 Vergleich des variablen Sättigungswertes $c_{s,0}$ und der „mittleren logarithmischen Differenz“ $\Delta c_{log}$ .....	35
<b>5.3 Gasbelastung, Gasgeschwindigkeit und Belegungsdichte.....</b>	<b>36</b>
5.3.1 Einflüsse auf die Strömung im Bereich der Gaszerteiler.....	38
<b>5.4 Zusammenhang Belüftungskoeffizient - Gasgeschwindigkeit .....</b>	<b>39</b>
<b>5.5 Sorptionskennzahl für Druckbelüftungssysteme .....</b>	<b>39</b>
<b>5.6 Gasdispergierkennzahl .....</b>	<b>41</b>
<b>5.7 Bestimmung der Leistungsaufnahme der Luftverdichter .....</b>	<b>41</b>
<b>6. AUSWERTUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE.....</b>	<b>43</b>
<b>6.1 Gaszerteiler Reinwasser. ....</b>	<b>44</b>
6.1.1 Plattenbelüfter .....	51
6.1.2 Tellerbelüfter .....	58
6.1.3 Rohrbelüfter .....	65
<b>6.2 Gaszerteiler in Belebtschlamm .....</b>	<b>72</b>
<b>6.3 Düsenbelüfter in Reinwasser .....</b>	<b>78</b>
<b>7. ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION .....</b>	<b>88</b>
<b>7.1 Gaszerteiler in Reinwasser .....</b>	<b>88</b>
<b>7.2 Gaszerteiler in Belebtschlamm .....</b>	<b>93</b>
<b>7.3 Düsenbelüfter in Reinwasser .....</b>	<b>94</b>

<b>8. LITERATUR .....</b>	<b>96</b>
<b>9. ANHANG.....</b>	<b>101</b>
<b>9.1 Gaszerteiler in Reinwasser .....</b>	<b>102</b>
<b>9.2 Gaszerteiler in Belebtschlamm .....</b>	<b>105</b>
<b>9.3 Düsenbelüfter in Reinwasser.....</b>	<b>107</b>

### VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Abbildung 3-1: Sauerstoffanstieg beim Auflüftversuch.....	14
Abbildung 3-2: Temperaturkorrekturfaktor $f_{T,20}$ .....	17
Abbildung 4-1: Marckholsheim schlechte Sulfitverteilung.....	22
Abbildung 4-2: Bludenz, schlechte Einmischung von Wasserstoffperoxid.....	23
Abbildung 4-3: Sauerstoffanstieg Hohenau gute Verteilung der Chemikalien .....	23
Abbildung 5-1: Sauerstoffgehalt und Partialdruck (bei $\eta = 3\%$ ) in Abhängigkeit der Wassertiefe.....	30
Abbildung 5-2: Sauerstoffgehalt und Partialdruck (bei $\eta = 0\%$ ) in Abhängigkeit der Wassertiefe.....	31
Abbildung 5-3: Variabler Sättigungswert zufolge Sauerstoffausnutzung in Reinwasser .....	32
Abbildung 5-4: Vergleich der mittleren logarithmischen Konzentrations- differenz und der Konzentrationsdifferenz $\Delta c_{s,0} = c_{s,t=0}$ .....	36
Abbildung 6-1: Belüftungskoeffizient $k_L a$ in Abhängigkeit der Gasgeschwindigkeit $v_g$ für Druckbelüftungssysteme in REINWASSER .....	45
Abbildung 6-2: Sorptionskennzahl $Y$ in Abhängigkeit der Gasbelastung $v_b$ für Druckbelüftung in REINWASSER.....	47

Abbildung 6-30: Sauerstofftrag $O_p$ in Abhängigkeit der Wassertiefe bei unterschiedlichen Sauerstoffgehalten und Temperaturen im Belebungsbecken BELEBTSCHLAMM.....	76
Abbildung 6-31: Sauerstofftrag $O_p$ in Abhängigkeit der Sauerstoffzufuhr OC bei unterschiedlichen Sauerstoffgehalten und Temperaturen in BELEBTSCHLAMM.....	77
Abbildung 6-32: Sorptionskennzahl $Y$ in Abhängigkeit der Gasdispersionkennzahl $X$ für Düsenbelüfter in REINWASSER .....	79
Abbildung 6-33: Sauerstofftrag $O_p$ in Abhängigkeit der Luftmenge $q_{LN}$ für Düsenbelüfter in <u>Mischbecken</u> .....	81
Abbildung 6-34: Sauerstofftrag $O_p$ in Abhängigkeit der Luftmenge $q_{LN}$ für Düsenbelüfter in <u>Umlaufbecken</u> .....	82
Abbildung 6-35: Sauerstofftrag $O_p$ , Luftmenge $q_{LN}$ und Leistungsverhältnis $P_w/P_L$ in Abhängigkeit der Sauerstoffzufuhr für 9 m, 12 m und 15 m Wassertiefe in <u>Mischbecken</u> .....	83
Abbildung 6-36: Sauerstofftrag $O_p$ in Abhängigkeit der Sauerstoffzufuhr OC für unterschiedliche Wassertiefe und Treibwasserleistung für Düsenbelüfter in <u>Mischbecken</u> .....	84
Abbildung 6-37: Sauerstofftrag $O_p$ in Abhängigkeit der Sauerstoffzufuhr OC für unterschiedliche Wassertiefe und Treibwasserleistung für Düsenbelüfter in <u>Umlaufbecken</u> .....	85
Abbildung 6-38: Sauerstofftrag $O_p$ , Luftmenge $q_{LN}$ und Leistungsverhältnis $P_w/P_L$ in Abhängigkeit der Sauerstoffzufuhr für 9 m, 12 m und 15 m Wassertiefe in <u>Umlaufbecken</u> .....	86
Abbildung 6-39: Sauerstofftrag $O_p$ in Abhängigkeit der Treibwasserleistung $P_w$ für 9 m Wassertiefe für Düsenbelüfter in Misch- und Umlaufbecken .....	87
Abbildung 7-1: Sauerstofftrag $O_p$ in Abhängigkeit der Wassertiefe für Plattenbelüfter, Tellerbelüfter und Rohrbelüfter .....	90
Abbildung 7-2: Sauerstofftrag $O_p$ in Abhängigkeit der Sauerstoffzufuhr OC für Plattenbelüfter, Tellerbelüfter und Rohrbelüfter.....	90
Abbildung 7-3: Sauerstofftrag $O_p$ in Abhängigkeit der Sauerstoffzufuhr OC für Düsenbelüfter in Misch- und Umlaufbecken .....	95

## VERZEICHNIS DER TABELLEN

Tabelle 4-1: $k_{La}$ -Werte [h <sup>-1</sup> ] in Abhängigkeit der weggelassenen Werte .....	22
Tabelle 5-1: Vergleich Belüftungskoeffizient und Sättigungswert .....	34
Tabelle 6-1: Anlagen Plattenbelüfter .....	51
Tabelle 6-2: Anlagen Tellerbelüfter .....	58
Tabelle 6-3: Anlagen Rohrbelüfter .....	65
Tabelle 6-4: Anlagen Druckluft Belebtschlamm .....	72
Tabelle 6-5: Anlagen Düsenbelüfter .....	78
Tabelle 7-1: Einsatzbedingungen Gaszerteiler .....	88
Tabelle 7-2: Korrelations - Beiwerte .....	67
Tabelle 7-3: Koeffizienten zur Berechnung der Sorptionskennzahl von Düsenbelüftern .....	94

## VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN

A, a	Koeffizient	
A	Fläche, Oberfläche	[m]
a	spezifische Phasengrenzfläche	[m <sup>-1</sup> ]
B, b	Koeffizient	
BD	Belegungsdichte	[m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]
C	Konstante	
c	Sauerstoffkonzentration	[g/m <sup>3</sup> ]
c <sup>''</sup>	mittlerer Sauerstoffsättigungswert	[g/m <sup>3</sup> ]
c <sup>*</sup>	virtuelle Sauerstoffsättigung	[g/m <sup>3</sup> ]
c <sub>s</sub>	Sauerstoffsättigungskonzentration	[g/m <sup>3</sup> ]
c <sub>s,∞</sub>	Sauerstoffsättigungskonzentration bei Versuchsende (t → unendlich)	[g/m <sup>3</sup> ]
Δc	Konzentrationsdifferenz	[g/m <sup>3</sup> ]
Δc <sub>log</sub>	mittlere logarithmische Sättigungsdifferenz	[g/m <sup>3</sup> ]
Δc <sub>s,0</sub>	Sauerstoffsättigungs-Defizit zum Zeitpunkt t=0	[g/m <sup>3</sup> ]
D	Diffusionskoeffizient	[m <sup>2</sup> /s]
d <sub>B</sub>	Blasendurchmesser	[m]
ET	Einblastiefe	[m]
H <sub>r</sub>	Verlusthöhe	[m]
F	Konstante	
f <sub>T,θ</sub>	Umrechnungsfaktor für die Sauerstoffzufuhr von Versuchstemperatur T auf Bezugstemperatur θ	[-]
g	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
GK	Gerätekonstante	[Umdrehungen/kWh]
GF	Gleichverteilungsfaktor	[-]
h	Laufvariable der Wassertiefe von der Wasseroberfläche zum Beckenboden gerichtet	[m]
H	Wassertiefe	[m]

H	Henry-Koeffizient	$\left[ \frac{\text{bar m}^3}{\text{mol}} \right]$
$k_{L,a}$	Belüftungskoeffizient	[1/h]
$k_{L,a}^{\text{„wahr“}}$	„wahrer“ Belüftungskoeffizient	[1/h]
n	Zählvariable, Anzahl der Impulse	[-]
n	Koeffizienten	[-]
OC	Sauerstoffzufuhr	[g/m <sup>3</sup> /h]
OC*	Sauerstoffeintrag unter Standardbedingungen	[kg/h]
OC <sub>10</sub>	Sauerstoffzufuhr unter Standardbedingungen	[g/m <sup>3</sup> /h]
Op	Sauerstoffertrag	[kg/kWh]
OV	Sauerstoffverbrauch	[g/m <sup>3</sup> /h]
P	Leistung	[kW]
P <sub>R</sub>	Leistung pro Volumseinheit	[kW/m <sup>3</sup> ]
p	Druck	[bar]
$\Delta p$	Druckdifferenz	[mbar]
Q	Luftvolumenstrom bei Normbedingungen	[m <sup>3</sup> /h]
q	Luft-Volumenstrom bezogen auf das belüftete Beckenvolumen	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> /h]
r <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmaß	[-]
T	Temperatur	[°C]
$\Delta T$	Temperaturdifferenz	[°C]
t	Zeit	[s]
V	Volumen	[m <sup>3</sup> ]
v	Geschwindigkeit	[m/s]
v <sub>b</sub>	Gasbelastung	[m/h]
v <sub>g</sub>	Gasgeschwindigkeit	[m/h]
WK	Wandlerkonstante	[A/A]
x'	Molenbruch Eintrittszustand	[mol/mol]
x''	Molenbruch Austrittszustand	[mol/mol]
x'*p	g Sauerstoff pro m <sup>3</sup> Luft bei Normbedingungen = 300 g/m <sup>3</sup>	[g/m <sup>3</sup> ]
X	Gasdispersionkennzahl	[-]
Y	Sorptionskennzahl	[-]

$\alpha$	Grenzflächenfaktor	[-]
$\alpha^*$	Grenzflächenfaktor berechnet aus den Sorptions-kennzahlen	[-]
$\eta$	Sauerstoffausnutzung	[g/g/m]
$\pi$	Druck	[bar]
$\nu$	kinematische Viskosität	[m <sup>2</sup> /s]
$\rho_{O_2}$	Dichte von Sauerstoff (=1428 g/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> )	[g/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]; [(g/m <sup>3</sup> /1bar)]
$\Delta$	Differenz	
$\theta$	Faktor zur Berechnung der Temperaturabhän- gigkeit der Belüftungskoeffizienten	[-]

**Indizes:**

BB	Belebungsbecken
ges	gesamt
H	Position auf Höhe der Gaszerteiler
L	Luft
N	Normbedingungen (1013 mbar; 0°C)
O <sub>2</sub>	auf den Sauerstoff bezogen
R	auf das Volumen bezogen
s	Sättigung
T	aktuelle Temperatur
t	Zeitpunkt
w	Wasser
g	Bezugstemperatur
o	Ruhezustand, Anfang, Beckenoberfläche
∞	zum Zeitpunkt t → unendlich

## KURZFASSUNG

Die vorliegende Arbeit umfaßt zu Beginn einen kurzen Abriß über Stofftransportvorgänge mit Schwerpunkt „Luftblasen in Wasser“. Danach werden die experimentellen Methoden und Auswerteverfahren zur Ermittlung der Sauerstoffzufuhr und des Sauerstoffertrages angesprochen. Aus der praktischen Erfahrung mit Sauerstoffzufuhr-Messungen werden Interaktionen zwischen der Versuchsdurchführung und den Randbedingungen auf der Kläranlage auf das Meßergebnis dargestellt. Anhand einiger grundlegender Gedanken zu den Vorgängen beim Stofftausch wurde bestätigt, daß die mit der in der Abwassertechnik üblichen Vorgangsweise ermittelten Werte für die Sauerstoffzufuhr direkt in dimensionslose Kennzahlen übergeführt werden können. Aus den Resultaten von Sauerstoffzufuhrmessungen auf großtechnisch realisierten Kläranlagen wurden die Sorptionskennzahl und die Gasdispersionkennzahl berechnet. Für verschiedene Gaszerteiler und einen Düsenbelüfter konnten Korrelationen mit der Gasbelastung bzw. der Gasdispersionkennzahl in Reinwasser ermittelt werden. Aus diesen Korrelationen wurden schließlich Sauerstoffzufuhr-Charakteristiken für Gaszerteiler und Düsenbelüfter in Reinwasser berechnet. Aus den Zusammenhängen zwischen dem Sauerstoffertrag und der Sauerstoffzufuhr wurden Hinweise zur Auslegung und den Betrieb von Belüftungssystemen formuliert.

## SUMMARY

After a short review about mass transfer of air bubbles in water a description of experimental methods and methods of evaluation connected to oxygen transfer is given.

Practical experience and the results from different oxygen transfer measurements allowed to describe interactions between the layout of these measurements and influencing factors. The results obtained from operating wastewater treatment plants and some basic ideas about oxygen transfer were used to generate specific sorption- and gas dispersion numbers. It was possible to correlate these numbers to different systems of gas spargers. These correlations led to the description of basic process characteristics for different aeration systems and provide applicable tools for the design and operation of aeration systems.

## 1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Bei der biologischen Reinigung von Abwasser nimmt das Belebungsverfahren eine herausragende Rolle ein. Für die im aeroben Milieu ablaufenden Stoffwechselforgänge ist die Versorgung der Mikroorganismen mit Sauerstoff entscheidend. Die Sauerstoffzufuhr in Belebungsanlagen wird mit Belüftungssystemen sichergestellt. Seit der Einführung des Belebungsverfahrens wurden Fragen der Sauerstoffzufuhr von vielen Abwasserfachleuten bearbeitet. Ziel dieser Anstrengungen war immer die Bestimmung der Sauerstoffzufuhr, die Verbesserung der Funktion und die Reduktion der Kosten.

Die Kenntnis der Sauerstoffzufuhrleistung eines Belüftungssystems ist für den Anlagenbetrieb wichtig. Sie bestimmt gemeinsam mit der Anlagengröße die maximale Belastbarkeit der Anlage. Neben dem Garantienachweis ist die Messung für die Weiterentwicklung und Optimierung von Belüftungssystemen von Bedeutung.

Die praktische Bedeutung von Oberflächenbelüftungssystemen in der kommunalen Abwasserreinigung ist rückläufig. Bei diesen Systemen hat es in den vergangenen 20 Jahren praktisch keine Weiterentwicklung gegeben. Anders bei den Druckbelüftungssystemen, hier hat es in den Bereichen der Gaszerteileranordnung, dem Material und der Geometrie der Gaszerteiler neue Erkenntnisse und Innovationen gegeben. Das am häufigsten eingesetzte Belüftungssystem ist heute die Druckbelüftung. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich daher auf Druckbelüftungssysteme.

In der Literatur findet man viele Resultate einzelner Messungen mit verschiedenen Belüftungssystemen aber wenige zusammenfassende Darstellungen. Im großtechnischen Maßstab gibt es kaum systematische Untersuchungen der Einsatzbedingungen. Die Hersteller von Belüftungssystemen haben für ihr Produkt entsprechende Auslegungsrichtlinien.

Die Wirtschaftlichkeit eines Belüftungssystems wird vom Belüfter selbst und den Einsatzbedingungen auf der jeweiligen Anlage bestimmt. Das Wissen um die Sauerstoffzufuhr in Belebungsanlagen ist bereits sehr umfangreich. Trotzdem ist bis heute der Einfluß der Einsatzbedingungen für die verschiedenen Systeme nur punktuell geklärt. Gründe dafür sind die Unbestimmtheit des Stoffsystems Abwasser - Belebtschlamm - Luft, aber auch die derzeit üblichen, nicht einheitlichen Angaben über die Leistungsfähigkeit von Gaszerteilern. Im Rahmen dieser Arbeit werden Festlegungen für die Beschreibung der Einsatzbedin-

gungen vorgeschlagen. Als Randbedingungen für den Einsatz von Druckbelüftungssystemen sind zu nennen:

- die Beckenform (Misch- und Umlaufbecken)
- der Wassertiefe
- die Gasleerrohrgeschwindigkeit (als Maß für den Energieeintrag pro Volumseinheit)
- die Art der Gaszerteiler (z.B. Platten-, Teller- und Rohrbelüfter)
- die abgasende Oberfläche des Gaszerteilers
- die Belegungsichte
- die Luftbeaufschlagung der Gaszerteiler
- das Zusammenwirken von Beckenform und Einbaugeometrie der Gaszerteiler

Die Beckenform und die Einbaugeometrie der Gaszerteiler hat auf das Strömungsverhalten und damit auf die Sauerstoffzufuhr wesentlichen Einfluß. Auch bei flächig angeordneten Systemen bilden sich Strömungswalzen aus. Dadurch ergeben sich Probleme beim scale up. Durch die gestiegenen Anforderungen an das Reinigungsergebnis sind heute größere Beckenvolumina erforderlich als noch vor 5 Jahren. Dieser Umstand begünstigt den Trend zu tieferen Belebungsbecken, um den Platzbedarf einzuschränken. Die heute übliche größere Wassertiefe verschärft die Fragestellung nach der realen Strömungsbildung in Belebungsbecken. Gemessene Abhängigkeiten und Zusammenhänge sind daher nur dann für die Praxis relevant, wenn sie in möglichst großem Maßstab ermittelt wurden.

Der praktische Teil der vorliegenden Arbeit besteht daher aus der Ermittlung der Sauerstoffzufuhr auf großtechnischen Anlagen, mit der Erfassung aller oben genannten Randbedingungen. Aus Zusammenhängen zwischen dem Sauerstofftrag und der Sauerstoffzufuhr sollen Hinweise zur Auslegung von Belüftungssystemen formuliert werden.

## 2. STOFFTRANSPORT

In dieser Arbeit wird der Stofftransport im System „Reinwasser - Luft“ und „Belebtschlamm-Abwasser-Gemisch - Luft“ behandelt. Wobei der Sauerstoff die betrachtete Gaskomponente der Luft ist.

Der Grund für den Stofftransport ist ein Konzentrationsunterschied in einer Phase bzw. die Störung des Gleichgewichtes zwischen den Phasen. Beim Stofftransport vollzieht sich ein Ausgleichsvorgang. Hierbei werden Moleküle eines betrachteten Stoffes aus Bereichen höherer Konzentration in Bereiche mit niedrigerer Konzentration transportiert.

Grundsätzlich erfolgt der Transport auf zwei Arten:

- Stofftransport durch molekulare Diffusion: darunter wird der Transport eines betrachteten Stoffes innerhalb eines nicht bewegten Mediums verstanden. Die Beschreibung der transportierten Stoffmenge kann je nach dem, ob es sich um einen stationären oder instationären Vorgang handelt durch das erste bzw. das zweite Fick'sche Gesetz beschrieben werden.
- Stofftransport durch Konvektion: darunter wird der Transport eines Stoffes verstanden, wenn die Phase nicht mehr in Ruhe ist, sondern bewegt wird. Die Bewegung kann durch Rührer oder durch Dichteunterschiede im Medium (man spricht dann von freier Konvektion) bewirkt werden. Die durch die Bewegung hervorgerufene Turbulenz der Phasengrenzschicht bewirkt, daß sich sehr rasch ein Konzentrationsausgleich einstellt.

Zwischen Gas- und Flüssigphase besteht nach dem Henry'sche Gesetz ein Zusammenhang zwischen der Konzentration eines Stoffes in der Gasphase und der zugehörigen Gleichgewichtskonzentration in der Flüssigphase. Wenn nun, wie beim Stofftausch Luftsauerstoff in Wasser, Sauerstoff durch die Phasengrenzfläche in den Wasserkörper transportiert wird, so spricht man von Stoffdurchgang.

Die einfachste Beschreibung von Stoffdurchgangsproblemen wurde mit der 2-Filmtheorie von LEWIS und WHITMAN (1924) gegeben. Darin wird ein gasseitiger und ein flüssigkeitsseitiger Transportwiderstand (Stoffübergangskoeffizient) definiert. Die 2-Filmtheorie setzt voraus, daß die Phasengrenze selbst keinen Widerstand für den Stofftransport darstellt und daß sich an der Phasengrenze stets das Gleichgewicht nach Henry ein-

stellt. Außerdem sind konvektive Vorgänge an der Phasengrenze ausgeschlossen. Diese Voraussetzungen sind in dem Bereich, wo es zu großen Turbulenzen an der Phasengrenzfläche kommt und bei Anlagerungen von oberflächenaktiven Substanzen an der Phasengrenzfläche nicht erfüllt und erlauben keine uneingeschränkte Anwendung der 2-Filmtheorie. Vergleichsrechnungen mit aufwendigen Modellen zeigen aber, daß die mit der Zweifilmtheorie erhaltenen Resultate für praktische Anwendungen in der Regel trotzdem brauchbar sind (DECKWER 1985).

Das eigentliche Problem bei der Anwendung der 2-Filmtheorie besteht aber in der nur theoretisch möglichen Bestimmung der Phasengrenzflächenkonzentrationen. Durch eine entsprechende Bilanzierung des transportierten Stoffstromes und der Einführung des Henry'schen Gesetzes gelingt es aber diese unbekanntenen Konzentrationen zu eliminieren, so daß ein Stoffdurchgangskoeffizient formuliert werden kann.

Ziel vieler Untersuchungen war es, in Abhängigkeit des Stoffsystemes und verschiedener Randbedingungen, die Stoffübergangskoeffizienten zu ermitteln. Es wurden eine Vielzahl von Modellen vorgeschlagen. Leider weichen die Resultate je nach den getroffenen Festlegungen sehr stark voneinander ab. An dieser Stelle ist auf die Arbeit von ELSTNER (1978) hinzuweisen, darin werden die einzelnen Modelle im Hinblick auf ihre Gültigkeit miteinander verglichen. Gemeinsam ist allen Modellen die Abhängigkeit des Stoffübergangskoeffizienten vom Diffusionskoeffizienten. Die Genauigkeit der Resultate wird dementsprechend von den verwendeten Diffusionskoeffizienten mitbestimmt. Auch hier existieren verschiedene Korrelationen und Methoden, die eine Ermittlung des Diffusionskoeffizienten erlauben. Für die entsprechenden Korrelationen und Zahlenwerte wird auch hier auf die einschlägige Literatur verwiesen (z.B. REID et al 1977).

Viele Untersuchungen wurden an Einzelblasen (diskrete Betrachtung) durchgeführt und danach der Versuch unternommen, die Resultate auf den technisch interessanten Blasenschwarm zu übertragen. Ein anderer Ansatz ist die makroskopische Betrachtung des Stofftauschvorganges von Blasenkollektiven in Flüssigkeiten.

Bei der unkritischen Durchsicht der verfügbaren Literatur entsteht leicht der Eindruck, daß für beliebige Anwendungsfälle entsprechende Berechnungsmethoden und Korrelationen für den Stoffübergangskoeffizienten zur Verfügung stehen. In der Arbeit von HALLENSLEBEN (1980) werden verschie-

dene Korrelationen gegenübergestellt und aufgezeigt, daß je nach verwendeter Korrelation Abweichungen von über 600 % erhalten werden.

Tatsache ist, daß mit den zur Verfügung stehenden Modellen und theoretischen Ableitungen eine Vorausberechnung der Stoffübergangskoeffizienten mit der erforderlichen Genauigkeit nicht möglich ist.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit einen Überblick der einschlägigen Literatur zum Stofftausch geben zu wollen wäre vermessen. Für die Grundlagen wird auf Handbücher zum Wärme- und Stofftransport verwiesen (z.B. BAEHR/STEPHAN 1994 und speziell für Blasensäulen DECKWER 1985).

## 2.1 Mischcharakteristik von Reaktoren

Der Konzentrationsverlauf in einem Reaktor ist durch sein Dispersionsverhalten gekennzeichnet. Unter Dispersion wird ein Ausgleichsvorgang in einem strömenden Medium verstanden.

Der Stofftausch wird einerseits durch die „Turbulenz“ an der Phasengrenzfläche und andererseits durch die Dispersion im Reaktor bestimmt. Beide Einflußfaktoren sind wesentlich von den Belüfterelementen und deren Verteilung im Becken abhängig.

Man unterscheidet zwischen:

- Rührkesselreaktor (CSTR), bei dem sowohl die Temperatur als auch die Konzentrationen der beinhaltenen Stoffe ortsunabhängig sind, d.h. der Reaktorinhalt ist vollständig durchmischt.
- Propfenströmungsmodell (PFM), hier sind die Konzentrationen und die Temperatur innerhalb des Reaktors einer Veränderung unterworfen, d.h. es treten Gradienten der Parameter auf.

Für die Rührkesselcharakteristik ergibt sich ein maximaler Stoffdurchgangskoeffizient und für die Pfropfenströmung, zufolge der großen treibenden Konzentrationsdifferenz, ein minimaler Stoffdurchgangskoeffizient. Der Festlegung der treibenden Konzentrationsdifferenz innerhalb eines Reaktors kommt große Bedeutung zu, da sie von den hydrodynamischen Verhältnissen abhängt.

Die Anwendung von unpassenden Auswertemodellen im Hinblick auf die Fluidodynamik führt zu Abhängigkeiten von Parametern, die bei Verwendung geeigneter Modellannahmen nicht auftreten (DECKWER 1985), z.B. eine Abnahme des  $k_L a$  - Wertes mit zunehmender Aufstiegshöhe.

Zwischenstufen werden mit ihrem Dispersionsverhalten charakterisiert. Für eine Modellrechnung werden dann in Analogie zum Fick'schen Ansatz für die Diffusion Dispersions- oder Durchmischungsströme formuliert. Die Vorausberechnung des Stoffaustausches setzt die Kenntnis der Dispersionskoeffizienten und der Stoffaustauschparameter mit genügender Genauigkeit voraus. Gerade diese Größen sind aber stark von den geometrischen Parametern abhängig. Die Bilanzierung eines differentiellen Volumenelementes innerhalb des Reaktors führt auf ein System von Differentialgleichungen, die in der Regel nur mehr mit numerischen Methoden einer Lösung zugänglich sind. Die Modellrechnungen werden daher mit Versuchen gekoppelt, um auf diese Art Grundlagen für die Reaktorauslegung zu ermitteln.

In den meisten Fällen sind Belebungsbecken, auch große Umlaufbecken, als vollständig durchmischt anzusehen. Das Dispersionsverhalten kann in die Quervermischung und in die Längsdurchmischung geteilt werden. Wobei die Quervermischung in der Regel vollständig, die Längsvermischung aber bei Längs- oder Umlaufbecken siehe dazu auch ATV (1985) nur teilweise gegeben ist.

In der Praxis bedeutet das, daß die Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Belüftungssystemen in der Abwassertechnik nur unter großtechnischen Bedingungen möglich ist. Darauf hat auch ZLOKARNIK (1980c) mit seiner Forderung nach Versuchsbecken mit mehreren Metern Durchmesser bereits hingewiesen.

## **2.2 Reaktor „Belebungsbecken“**

Das Belebungsbecken stellt aus verfahrenstechnischer Sicht einen biotechnischen Reaktor dar. Der Kopfdruck (Druck an der Flüssigkeitsoberfläche) ist in der Regel durch den Umgebungsluftdruck bestimmt und die Reaktortemperatur beträgt bis zu 40°C. Der Unterschied zu Apparaten der Verfahrenstechnik ist durch die Abmessungen und der damit verbundenen Strömungsbildung gegeben. Das Spektrum reicht hier von Blasensäulen mit großem Schlankheitsgrad bis zu Umlaufbecken mit 2,5m Wassertiefe und mehreren tausend Quadratmetern Grundfläche.

In der Verfahrenstechnik ist es üblich Reaktionsräume durch

- das Dispersionsverhalten
- die Phasenanteile
- die Phasengeschwindigkeiten
- die Phasengrenzfläche, etc. zu beschreiben

In der Abwassertechnik werden obige Parameter in anderer Definition oder gar nicht bestimmt. Es ist aber üblich Parameter anzugeben, die das Belüftungssystem festlegen, dazu gehören:

- der Luftdurchsatz, bezogen auf einen Belüfter und
- die Belegung der Beckensohle mit Belüftern

Das Produkt dieser Parameter repräsentiert die Gas(leerrohr)geschwindigkeit, aber auch eine Aussage über die Gaszerteilung (Beaufschlagung der abgasenden Fläche).

Häufig wird die Leistung bezogen auf die Volumseinheit  $P_{BB}$  in  $[W/m^3_{BB}]$  angegeben. Durch Division, mit dem in der Abwassertechnik üblichen Ansatz der „spezifischen Einblasenergie“  $= 5 \text{ Wh}/(m^3_N \cdot m_{ET})$ , wird wiederum die Gasgeschwindigkeit (bezogen auf Normbedingungen) ermittelt. In der Verfahrenstechnik wird die Gasgeschwindigkeit üblicherweise auf den mittleren Systemdruck bezogen. Die aus den „abwassertechnischen Parametern“ ermittelte Gasgeschwindigkeit kann mit der Wassertiefe auf die „verfahrenstechnische Gasgeschwindigkeit“ umgerechnet werden, wenn man eine einheitliche Betrachtung anstrebt.

Der Gasanteil (hold up) wird mit dem Volumenstrom bezogen auf Normbedingungen und die Gasgeschwindigkeit bezogen den halben Systemdruck berechnet. Andererseits stehen Informationen über die Blasengrößenverteilung oder das Dispersionsverhalten in der Abwassertechnik in der Regel nicht zur Verfügung.

Diese Beispiele sollen zeigen, daß die Abwassertechnik und die Verfahrenstechnik teilweise eine andere Nomenklatur verwenden, entsprechende Umrechnungen aber möglich und sinnvoll sind.

### **2.3 Einflüsse auf den Stofftransport**

Die bekannten Einflußfaktoren auf den Stofftausch wie

- physikalische, chemische und thermodynamische Größen (Druck, Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit, Löslichkeit, Konzentrationsdifferenz, .....
- geometrische Parameter (Beckengeometrie, Art und Aufteilung der Belüfterelemente, Blasengeometrie,.....)
- Rheologie des Stoffsystemes (Abwasserinhaltsstoffe, Koaleszenzneigung, .....

sind nicht isoliert zu betrachten. In den obigen Begriffen sind mehrere Einzel-faktoren zusammengefaßt. Außerdem gibt es Abhängigkeiten der Einflußfaktoren untereinander. So hat beispielsweise die Temperatur oder die Tensidkonzentration einen Einfluß auf die Rheologie der Flüssigkeit. Dadurch wird die Hydrodynamik der aufsteigenden Luftblasen und damit auch der Stofftransport verändert.

### 2.3.1 Hydrodynamik von Gasblasen und Blasenschwärmen

In Abhängigkeit der Blasengröße stellt sich eine Form und *Beweglichkeit der Blasenoberfläche* ein, die für den Stofftausch von Bedeutung ist. Diese Tatsache ist in einigen Modellen zum Stoffdurchgang durch entsprechende Parameter berücksichtigt. Es gibt viele Untersuchungen, mit dem Ziel, die Bewegung (bzw. die Aufstiegs- oder Schlupfgeschwindigkeit) zu beschreiben (WAGNER 1991). Durch die bewegliche Blasenoberfläche wird die Turbulenz an der Phasengrenzschicht vergrößert, und dadurch der Stofftausch begünstigt. Die in der Abwassertechnik heute üblichen Blasen sind bei der Entstehung als starr anzusehen. Während des Aufsteigens verändern sie zufolge der Stofftauschvorgänge (Wasserdampf, CO<sub>2</sub> hinein, O<sub>2</sub> hinaus) und dem sich ändernden hydrostatischen Druck ihre Größe. In der Regel erfahren sie dabei eine Änderung von starrer Oberfläche zu bewegter Blasenoberfläche. Dadurch sind die Berechnungsansätze, die entweder nur auf starren bzw. nur auf beweglichen Oberflächen basieren, genau auf ihre Anwendbarkeit zu prüfen.

Die Aufstiegsbewegung von Gasblasen in einer Flüssigkeit wird von der Blasen-geometrie und den rheologischen Eigenschaften des Stoffsystemes bestimmt. Im Belebungsbecken treten jedoch eine Vielzahl von Blasen auf, wodurch deren Verhalten in der Flüssigkeit verändert wird. Es gibt hier eine große Zahl experimenteller Untersuchungen, deren Ergebnisse von WAGNER (1991) zusammengestellt wurden. Darin werden in erster Linie Einzelblasen und Blasenkollektive, wie sie in Blasensäulen auftreten, betrachtet.

Eine wesentliche Einschränkung der Anwendbarkeit der Untersuchungsergebnisse aus der Literatur ist durch die Versuchsdurchführung ohne Berücksichtigung der Gaszerteilereinflüsse verursacht. Gerade der Einfluß der Belüfterelemente selbst und deren Anordnung im Belebungsbecken sowie der Maßstab ist entscheidend für die Sauerstoffzufuhr und den Sauerstofftrag.

Die Ausbildung der Strömung in einem Belebungsbecken wird maßgeblich von der Anordnung der Gaszerteiler an der Beckensohle bestimmt. In der Abwassertechnik ist die Anzahl und Aufteilung der Gaszerteiler ein Kostenfaktor (high volume- low price). In der Regel werden etwa 10 -20 % (bis 50% bei Platten-

belüftern) der Bodenfläche mit Belüftern belegt. Die Teilbelegung begünstigt die Ausbildung von Strömungswalzen, die die Aufenthaltszeit der Gasblasen und damit den Stofftausch beeinträchtigt.

### 2.3.2 Variable Blasengröße

Beim Aufsteigen einer Gasblase in einer Flüssigkeit verändert sich die Blasengröße zufolge:

- des abnehmenden hydrostatischen Drucks
- durch die Abgabe von Gaskomponenten in die Flüssigphase und
- der Aufnahme von Gaskomponenten aus der Flüssigphase.

Die Veränderung der Größe zufolge Temperaturänderungen wurde vernachlässigt. Es kann in erster Näherung angenommen werden, daß die Blase gleich bei ihrer Entstehung die Temperatur des Wassers annimmt und isotherm aufsteigt.

Unter den Bedingungen wie sie in einem Belebungsbecken herrschen wird angenommen, daß nur der abnehmende hydrostatische Druck eine Veränderung bewirkt, und der Sauerstofftransport aus der Gasphase durch die Aufnahme von Kohlendioxid kompensiert wird.

Bei einer gängigen Wassertiefe von 5m vergrößert sich der Blasendurchmesser während des Aufsteigens um ca. 15%, damit vergrößert sich die Oberfläche um ca. 30%.

In Reinwasser, wenn also kein CO<sub>2</sub> durch den Stoffwechsel der Mikroorganismen produziert wird, ist die Blasendurchmesserreduktion proportional der Sauerstoffausnutzung. Sie liegt für gute Systeme mit einer Sauerstoffausnutzung von 5%/m und einer Wassertiefe von 5m in der Größenordnung von 2%. Die Phasengrenzfläche wird dadurch um ca. 4% reduziert. Die Vernachlässigung des Einflusses der Blasendurchmesserreduktion auf den Stofftransport ist damit auch in Reinwasser zulässig.

Die Veränderung der Blasengröße wirkt sich auf die Hydrodynamik der Luftblase und auf die Größe der Phasengrenzfläche aus.

### 2.3.3 Stoffsystem

Viele Betrachtungen basieren nur auf Untersuchungen mit Reinwasser. Die Rheologie von Belebtschlamm-Abwasser Gemischen ist variabel. Durch diese Einflüsse ändert sich die Strömung und damit ändern sich die Stoffeigenschaften, die den Stofftausch beeinflussen.

Bei der Belüftung von Belebtschlammssystemen taucht sehr rasch die Frage auf, welchen Einfluß haben

- die gelösten Stoffe
- die suspendierten Feststoffe und
- die biologische Aktivität auf den Stofftausch.

Gelöste Stoffe: Einerseits wird durch Tenside die Oberflächenspannung herabgesetzt wodurch kleinere Blasen entstehen und die Phasengrenzfläche und der Gasgehalt steigt, andererseits wird aber der Stofftransport behindert wodurch in Summe der Sauerstoffeintrag geringer wird (ELSTNER 1978, WAGNER 1991). Salze haben eine erhöhende Wirkung auf den Stofftausch (ZLOKARNIK 1978). Bei den in der kommunalen Abwassertechnik üblichen Salzgehalten kommt dieser Effekt nicht zu tragen. Sehr wohl aber ist eine Berücksichtigung bei speziellen Industrieabwässern (Industrieabwasserreinigungsanlagen) erforderlich. Ebenso ist bei der Bestimmung der Sauerstoffzufuhr in Reinwasser eine Beeinträchtigung des Stofftransportes durch „Aufsalzung“ zu vermeiden.

In Bezug auf die Feststoffe und die biologische Aktivität findet man in der Literatur widersprüchliche Aussagen. Eine Literaturübersicht findet man z.B. in DECKWER (1985). Mit inerten Feststoffen wird praktisch kein Einfluß auf den Stofftransport gefunden. In einer Laboranlage fand KAYSER (1967) für Oberflächenbelüfter und Druckbelüftung eine Abnahme der Sauerstoffzufuhr mit steigendem Schlammgehalt. In einer Großanlage erhielten DOWNING u. BOON (1963) keinen Zusammenhang zwischen der Sauerstoffzufuhr und der Schlamm Trockensubstanz. Keinen bis sehr geringen Einfluß vom Schlammgehalt fanden LISTER u. BOON (1973). Eine von HANEL (1982) durchgeführte Literaturobwertung kommt zu dem Schluß, daß die Sauerstoffzufuhr mit steigender Trockensubstanz leicht abnimmt

Wenn der Sauerstoffverbrauch zufolge der Stoffwechselaktivität der Mikroorganismen („Atmung“) sehr viel höher als Sauerstoffzufuhr ist, kann sich eine Erhöhung des Stofftransportes bezogen auf den Zustand ohne Reaktion ergeben. In der Verfahrenstechnik wird diese Erhöhung durch den Beschleunigungsfaktor (Enhancementfactor) beschrieben. Aufgrund der in der Abwassertechnik üblichen Randbedingungen, der Sauerstoffgehalt im Belebungsbecken sollte jedenfalls größer Null (bevorzugt etwa  $2 \text{ g/m}^3$ , d.h. die Atmung ist kleiner als die maximale Sauerstoffzufuhr) sein, ist eine solche Erhöhung aber meist nicht gegeben.

### 3. VERSUCHSTECHNIK

Experimente in der Verfahrenstechnik zielen in der Regel drauf ab, folgende Parameter zu ermitteln:

- Dispersionsverhalten
- Gasanteil
- Gasleerrohrgeschwindigkeit
- Phasengrenzfläche
- Konzentrationsprofile der Phasen

Danach wird entsprechend dem vorliegenden Dispersionsverhalten ein Modell (CSTR, ADM, PFM) gewählt und daraus die Stoffübergangs- bzw. Stoffdurchgangskoeffizienten ermittelt. Eine Übersicht über experimentelle Methoden zur Bestimmung des Stoffüberganges findet man in der einschlägigen Fachliteratur (z.B. DECKWER 1985).

In der Abwassertechnik wird die instationäre Methode ohne Zu- und Abfluß der flüssigen Phase am häufigsten angewendete. Die Flüssigphase kann als vollständig durchmischt und die Gasphase als Pfropfenstömung betrachtet werden. Für den in dieser Arbeit betrachteten Stofftransport Wasser - Luft ist bekannt, daß der Stoffdurchgang durch den flüssigkeitsseitigen Stoffübergangskoeffizient bestimmt wird. Aus diesen Überlegungen, resultiert die bekannte Bestimmungsgleichung für die Sauerstoffzufuhr:

$$\frac{dc}{dt} = k_L a \cdot (c_s - c_t) \quad \text{Gleichung 3-1}$$

In der Abwassertechnik ist es üblich, das Produkt Stoffübergangskoeffizient mal spezifische Phasengrenzfläche zum „**Belüftungskoeffizienten**“  $k_L a$  zusammenzufassen. Dadurch können Sauerstoffzufuhrmessungen, nur durch die Messung der gelöst Sauerstoffgehalte, ohne großen apparativen Aufwand durchgeführt werden. Das Ziel von Sauerstoffzufuhrmessungen auf Kläranlagen ist die Ermittlung des Belüftungskoeffizienten  $k_L a$ , im verfahrenstechnischen Schrifttum wird er als volumetrischer Stoffübergangskoeffizient bezeichnet, und der Sättigungskonzentration  $c_s$ .

Prinzipiell ist zu unterscheiden, ob die Messung in Reinwasser ohne biologische Aktivität oder im Belebtschlamm-Abwasser-Gemisch durchgeführt wird.

### 3.1 Experimentelle Methoden

Für die Durchführung von Sauerstoffzufuhrmessungen in Reinwasser gilt in Österreich die ÖNORM M 5888, in Deutschland gibt es eine Arbeitsanleitung der ATV (1979) und in den USA einen Standard der ASCE aus dem Jahre 1992. Eine Gegenüberstellung der Methoden und Hinweise auf die Anwendungsgebiete gibt KAYSER (1986). Für Messungen in Belebtschlamm-Abwasser-Gemisch wurde die von KAYSER (1967, 1982) dargestellte Methode angewendet. Weitere wichtige Anregungen zur Versuchstechnik sind in ASCE (1993) sowie dem Merkblatt der ATV (1995) enthalten.

Bei der in der in ATV (1995) beschriebenen Methode wird der flüssigen Phase zunächst durch Zugabe von Chemikalien bzw. durch die Aktivität der Mikroorganismen der Sauerstoff entzogen und danach der Anstieg des Sauerstoffgehaltes im Reaktor unter definierten Betriebsbedingungen des Belüftungssystems registriert. Neben dieser *Absorptionsmethode* (Auflüftmethode) kommt auch die *Desorptionsmethode* (Entgasungsmethode) zur Anwendung. Hier wird die Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken künstlich angehoben (z.B. durch Begasung mit Reinsauerstoff oder durch Zugabe von Wasserstoffperoxyd). Anschließend wird die Abnahme der Sauerstoffkonzentration über der Zeit registriert. In beiden Fällen läßt sich aus dem zeitlichen Verlauf der Sauerstoffkonzentration der Belüftungskoeffizient  $k_L a$  und die Gleichgewichtskonzentration  $c_{s,\infty}$  zum Zeitpunkt  $t_{\infty}$  ermitteln.

Manchmal ist es bei groß angelegten Untersuchungsreihen günstig, die Verfahren zu kombinieren. So kann z.B. unter Betriebsbedingungen zunächst ein Auflüftungsversuch stattfinden danach kann Wasserstoffperoxyd zugesetzt werden und sofort ein Desorptionsversuch ablaufen. Danach kann das Belüftungssystem in seiner Leistung reduziert, und ein weiterer Desorptionsversuch angeschlossen werden. Durch geschickte Aneinanderreihung der einzelnen Versuchseinstellungen können Zeit und Chemikalien eingespart werden.

Bei den Reinwassermessungen wird zur Desoxydation üblicherweise Natriumsulfit benutzt. Zur Beschleunigung der Reaktion wird ein Kobaltsalz als Katalysator zugegeben. Auf Grund der Problematik der Freisetzung von Schwermetallen in die Umwelt ist jedenfalls auf eine Minimierung der Kobaltmenge Rücksicht zu nehmen. In diesem Zusammenhang ist auf die Arbeit von TERRY und THIEM (1989) hinzuweisen. Darin wird beschrieben, daß mit wesentlich geringeren Kobaltmengen zur Katalyse das Auslangen gefunden werden kann. In der Arbeitsanleitung der ATV (1995) wird darauf näher eingegangen. Auch

KAYSER hat 1986 einen Vergleich über die benötigten Chemikalienmengen angestellt. In Sonderfällen kann auch mit Stickstoff begast werden. Das hat den Vorteil, daß jegliche Aufsatzung des Reaktorinhaltes vermieden und damit eine Beeinflussung des Stofftransportes ausgeschlossen wird. Auch das Problem der Chemikalieneinmischung fällt weg.

Vereinzelt kam bei den eigenen Messungen auch die OFF-GAS Methode (gasseitigen Stoffbilanz) zum Einsatz. Eine Beschreibung der Methode findet man in ASCE (1992).

Die Meßergebnisse die mit stationären Methoden, bei denen der Reaktor durchströmt wird, ermittelt wurden, sind in der Regel mit größeren Ungenauigkeiten behaftet. Das Hauptproblem bei Betriebsmessungen mit Abwasser und Rücklaufschlammdurchfluß stellt die Tatsache dar, daß es kaum gelingt die Atmung konstant zu halten. Hier ist im Einzelfall abzuschätzen welcher Einfluß durch die veränderliche Atmung gegeben ist. Bei Absorptionsversuchen wird bei sinkender Atmung ein zu geringer Belüftungskoeffizient ermittelt (der „virtuelle Sättigungswert“  $c^*$  steigt). Umgekehrt wird bei sinkender Atmung bei Desorptionsversuchen ein zu großer Belüftungskoeffizient ermittelt. Wenn die Atmung steigt kehren sich die Verhältnisse um (BURDE 1986). Eine von HANEL (1982) durchgeführte Fehlerabschätzung zufolge fest gewordenen Natriumsulfits, das sich erst während des Versuchs langsam auflöst bzw. einer abnehmenden Schlammatmung, ergibt für Auflüftversuche eine Abweichung des  $k_L a$  von -10 bis -20 %. Auch KAYSER (1995) kommt zu einem ähnlichen Resultat. Bei einer 10%igen Abnahme der Atmung während einer Versuchsdauer von  $2 t_{90}$  ergibt sich eine Abweichung des  $k_L a$  von  $\pm 10\%$ . Bei Desorptionsversuchen treten positive und bei Absorptionsmessungen negative Abweichungen auf.

### **3.2 Auswerteverfahren**

Für die Auswertung der Meßdaten von Sauerstoffzufuhrversuchen stehen mehrere Verfahren zur Verfügung. Einen Überblick geben HANEL (1982) und WAGNER (1986). Darin findet man eine vergleichende Auswertungen der selben Meßreihen und der dazugehörige Fehlerabschätzungen. Sie kommen zu dem Schluß, daß die „nichtlineare Regression“ am besten für die Auswertung von Meßreihen geeignet ist. Der Sauerstoffanstieg über der Belüftungszeit ist in der Abbildung 3-1 für einen Auflüftungsversuch in Belebtschlamm dargestellt.

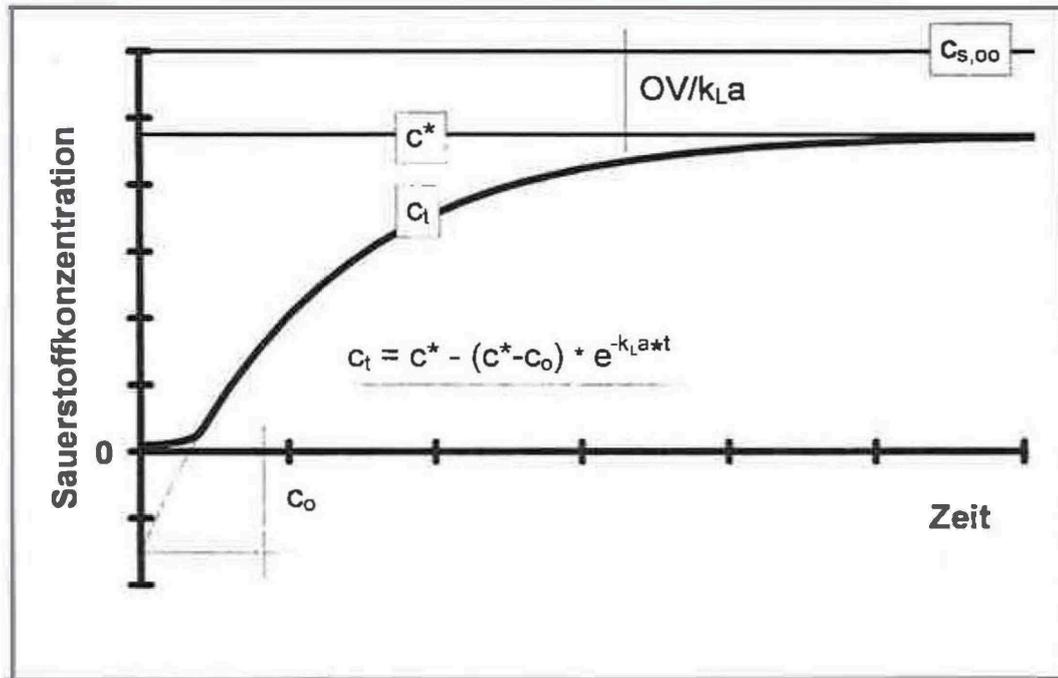


Abbildung 3-1: Sauerstoffanstieg beim Auflüftversuch

Die Auswertungen der eigenen Untersuchungen wurden mit der „nicht linearen Regression“, (ASCE 1992) vorgenommen. Diese Methode erlaubt im Vergleich zu anderen Methoden (z.B. ÖN M5888) die Verarbeitung vieler Meßwerte mit einer besseren Reproduzierbarkeit. Mit dieser Methode sind Absorptions- und Desorptionsversuche auswertbar. Als Resultat werden der Belüftungskoeffizient  $k_{L,a}$ , der im Versuch erreichte Sättigungswert  $c^*$  (in Reinwasser ist  $c^* = c_{s,00}$  KAYSER (1967)) und der Ordinatenabschnitt  $c_0$  bestimmt (die Genauigkeit entspricht der Sondenkalibrierung). Der Ordinatenabschnitt  $c_0$  ist für die mathematische Beschreibung der Kurvenform notwendig, da normalerweise der Versuchsbeginn  $t=0$  nicht mit dem Sauerstoffgehalt = 0 zusammenfällt. Das bedeutet der Anstieg des Sauerstoffgehaltes beginnt nicht im Koordinatenursprung sondern zeitverschoben.

### 3.3 Sauerstoffzufuhr und Sauerstoffertrag

Die transportierte Sauerstoffmenge ist dem jeweiligen Sauerstoffdefizit (Sauerstoffsättigung minus Sauerstoffgehalt im betrachteten Zeitpunkt) proportional. Als *Nennleistung der Belüftungseinrichtung* unter Standardbedingungen ( $OC_{10}$  in  $gO_2/m^3/h$ ) ist die Sauerstoffzufuhr bei

- einem Sauerstoffgehalt von  $0 gO_2/m^3$  in der Flüssigphase
- einer Temperatur von  $+10^\circ C$  (künftig  $20^\circ C$ ) in der Flüssigphase und
- einem Umgebungsluftdruck von  $1013 hPa$  definiert.

Der Bezugssauerstoffgehalt geht auf KESSENER u. RIBBIUS (1932,1934) zurück und wurde bis heute beibehalten. Diese Festlegung erfordert eine Umrechnung von  $k_L a$  und dem Sättigungsdefizit auf obige „Standardbedingungen“ KAYSER (1986).

Als Sauerstoffzufuhr ist in der Abwassertechnik das Produkt Belüftungskoeffizient mal maximaler Konzentrationsdifferenz definiert.

$$OC_{10} = k_L a * \Delta c_{\max} \quad [g/m^3h] \quad \text{Gleichung 3-2}$$

Als maximale Konzentrationsdifferenz wurde der sich einstellende Sauerstoffgehalt bei Versuchsende ( $c_{s,\infty}$ ) festgelegt. Der aus den Meßdaten unter den herrschenden Versuchsbedingungen ermittelte Sauerstoffgehalt  $c_{s,\infty}$  ist auf „Standardbedingungen“ umzurechnen, die Vorgangsweise ist in ATV (1995) dargestellt.

Die Praxis von Sauerstoffzufuhrmessungen in Reinwasser hat gezeigt, daß bei den üblichen Wassertiefen und Belüfterverteilungen ein  $c_{s,\infty}$  erreicht wird, der dem Partialdruck des Sauerstoffs bei halbem Systemdruck (auf Basis des Sauerstoffmolenbruchs in Luft von  $x_{O_2} = 0,21$ ) entspricht. Die Ermittlung von  $c_{s,\infty}$  kann daher auch rechnerisch erfolgen. Dazu wird der standard Sauerstoffsättigungswert  $c_s$  aus einer Sättigungstabelle entnommen (z.B. EN 25814 (1992) bzw. DIN 38 408 Teil 23) und nach Gleichung 3-3 berechnet:

$$c_{s,\infty} = c_s + c_s * \left( \frac{ET/2}{10,3} \right) \quad \frac{c \dots [g/m^3]}{ET \dots [m]} \quad \text{Gleichung 3-3}$$

Durch die Einschränkung auf „übliche“ Geometrien wird deutlich, daß der sich einstellende Sättigungswert vom Dispersionsverhalten des Reaktors bestimmt wird. Bei Messungen in einer Turmbiologie fand KAYSER (1986) Sättigungswerte die eher dem Zusammenhang

$$c_{s,\infty} = c_s + c_s * \left( \frac{ET/3}{10,3} \right) \quad \text{Gleichung 3-4}$$

gefolgt sind, also etwa dem Systemdruck in einem Drittel der Beckentiefe entsprechen haben. Bei Messungen in Belebtschlamm erfolgt die Bestimmung des Sättigungswertes ebenfalls nach Gleichung 3-3. Für weitere Details wird auf das Merkblatt ATV (1995) hingewiesen.

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

$$OC^* = \frac{OC_{10} \cdot V_{BB}}{1000} \quad \frac{OC^* \dots [kg/h]}{OC_{10} \dots [g/m^3/h]} \quad \text{Gleichung 3-5}$$

Aussagen über die Wirtschaftlichkeit eines Belüftungssystems können durch die Ermittlung des Sauerstofftrages ( $O_p$ ) gemacht werden. Er ist die maßgebliche Größe für den Energiebedarf des Belüftungssystems und mitbestimmend für die Betriebskosten der Kläranlage. Wichtig ist darauf hinzuweisen, daß eine Vielzahl anderer Faktoren auch erheblichen Einfluß auf die Betriebskosten des Belüftungssystems haben (v.d.EMDE 1968,1979, 1980). Der Sauerstofftrag unter Standardbedingungen  $O_p$  ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$O_p = \frac{OC^*}{P} \quad \frac{O_p \dots [kg/kWh]}{P \dots [kW]} \quad \text{Gleichung 3-6}$$

### 3.3.1 Umrechnung

Sowohl  $k_L a$  als auch  $c_{s,00}$  sind temperaturabhängig. Die Versuchstemperatur wird mit  $T$  und die Standardtemperatur mit  $\vartheta$  bezeichnet. Die Belüftungskoeffizienten können nach PASVEER (1955) allgemein umgerechnet werden:

$$k_{L,T} = k_{L,\vartheta} \cdot \sqrt{\frac{D_T}{D_\vartheta}} \quad \text{Gleichung 3-7}$$

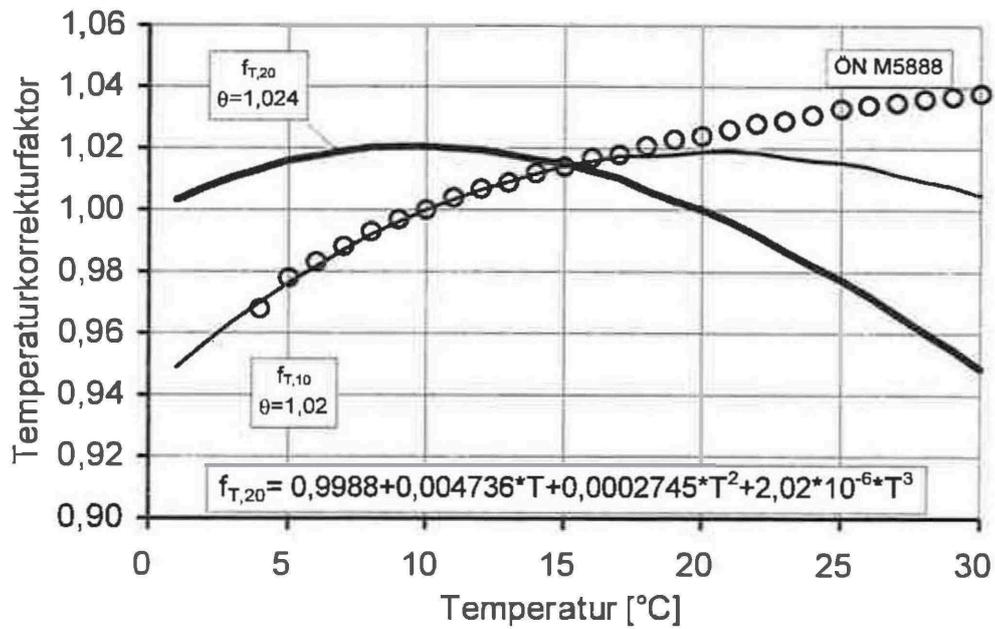
Die Wurzel aus dem Quotienten der Diffusionskoeffizienten kann nach folgender Beziehung berechnet werden. International wird heute mit einem Faktor  $\theta=1,024$  gerechnet ASCE (1992) und ATV (1995).

$$\sqrt{\frac{D_T}{D_\vartheta}} = \theta^{(T-\vartheta)} \quad \text{Gleichung 3-8}$$

In der ÖN M5888 ist für die Umrechnung auf Standardbedingungen die Multiplikation mit dem Temperaturkorrekturfaktor vorgesehen. Als Basis wurde  $\theta=1,02$  und die Sättigungstabelle der American Health Association verwendet.

$$f_{T,10} = \frac{k_{L,T} \cdot c_s \text{ (bei Standardtemperatur)}}{k_{L,T} \cdot c_s \text{ (bei Versuchstemperatur)}} \quad \text{Gleichung 3-9}$$

Künftig wird die Standardtemperatur  $\vartheta=20^\circ\text{C}$  betragen. In der folgenden Abbildung ist der Korrekturfaktor  $f_{T,20}$  auf Basis  $\theta=1,024$  und der Sauerstoffsättigungswerte der Tabelle in EN 25814 (1992) dargestellt:



**Abbildung 3-2: Temperaturkorrekturfaktor  $f_{T,20}$**

Für die getrennte Umrechnung des Belüftungskoeffizienten und des Sättigungswertes wird auf das Merkblatt ATV (1995) verwiesen.

## **4. EINFLUSSFAKTOREN AUF DAS MESSERGEBNIS**

Versuche, die auf Großanlagen durchgeführt werden stellen immer in dem einen oder anderen Punkt einen Kompromiß zwischen aussagekräftigem Resultat und vertretbarem finanziellen und zeitlichen Aufwand dar. Schon in der Planungsphase der Anlage können hier maßgebliche „Hindernisse“ für eine Ermittlung der Sauerstoffzufuhr ausgeschaltet werden. Der dafür erforderliche Mehraufwand ist im Vergleich zu den Kosten der Messung oft vernachlässigbar gering. So ist der Einbau einer Meßblende (Druckabnahmen vor Ort, ohne Auswertelektronik) zur Kontrolle der Luftmenge eine einfache und wirkungsvolle Maßnahme um den Vertrauensbereich von Meßergebnissen zu steigern.

In diesem Kapitel werden die Interaktionen zwischen dem Anlagentyp und der maschinellen Ausrüstung mit den ermittelten Meßwerten und den daraus berechneten Versuchsergebnissen besprochen.

### **4.1 Versuchsabwicklung**

Bei der Versuchsplanung ist speziell auf die vorhandene maschinelle Ausrüstung der Anlage und die daraus resultierenden Randbedingungen für die Versuchsdurchführung zu achten. Naturgemäß existiert eine sehr große Zahl von möglichen Kombinationen des Anlagentyps und der eingesetzten maschinellen Ausrüstung. Eine Zusammenstellung der notwendigen Maßnahmen vor, während und nach einem Sauerstoffzufuhrversuch ist in ATV (1995) in Form von check -Listen enthalten. Aus den Problemen, die bei den für diese Arbeit durchgeführten Versuchen, aufgetreten sind werden im Folgenden einige besprochen.

#### **4.1.1 Vorbereitungen**

Vor der eigentlichen Messung ist es empfehlenswert eine Kontrolle der ordnungsgemäßen Ausführung und Verschaltung des Belüftungssystems durchzuführen.

- Kontrolle der ordnungsgemäßen Ausführung und Verschaltung (Stellung von Armaturen) von Luftrohrleitungen und bei Düsenbelüftungssystemen der Treibwasserleitungen.
- Überprüfung ob alle Dichtungen vorhanden sind und Überdruck- und Sicherheitsventile ordnungsgemäß funktionieren (und nicht abblasen).
- Kontrolle ob eine Beeinflussung der Meßgeräte durch elektrische und magnetische Felder ausgeschlossen ist (Baustromkabel, usw.).

- Bedienbarkeit von Antriebsmaschinen (das Anfahren und Abstellen großer Antriebsmaschinen ist häufig durch elektrische Verriegelungen nicht uneingeschränkt möglich). Jedenfalls ist auf eine Überlastung der Antriebe und Arbeitsmaschinen Rücksicht zu nehmen.

Häufig stehen die zu untersuchenden Belebungsbecken mit anderen Beckenteilen hydraulisch in Verbindung. Hier ist abzuschätzen ob es zu einem großen Wasseraustausch kommen kann, der die Meßresultate beeinflusst. Bei Druckbelüftungssystemen ist dieser Einfluß meist gering, bei Oberflächenbelüftungssystemen kann er entsprechend der gerichteten Strömung beträchtlich sein. Bei kleinen Becken und/oder großen Öffnungen ist jedenfalls eine behelfsmäßige Abdichtung vorzunehmen.

#### 4.1.2 Luftmengenmessung

Häufig werden auf Großanlagen die Becken in mehrere Straßen und Einheiten unterteilt die Sauerstoffzufuhrmessung erfolgt jedoch nur in einem dieser Teilbecken. Um zu einem aussagekräftigen Resultat zu gelangen ist es erforderlich, die dem zu untersuchenden Becken zugeleitete Luftmenge genau zu erfassen. Eine gleichmäßige Verteilung der Luft auf mehrere Becken kann in der Praxis nicht vorausgesetzt werden. Als Meßverfahren kommen Blendenmessungen nach DIN 1952 sowie Turbinenradzähler oder Kolbengaszähler in Frage. Ein sehr zuverlässiges System stellt die Blendenmessung dar. Bei entsprechender Ausführung (Möglichkeit des Anschlusses eines Differenzdruckmanometers vor Ort) ist eine einfache Überprüfungsmöglichkeit gegeben. Zur Erfassung der Zustandsgrößen der Luft sind Anschlußmöglichkeiten für den Luftdruck und die Lufttemperatur in der Rohrleitung zweckmäßig.

Die für betriebliche Zwecke eingesetzten Meßeinrichtungen dienen häufig nur dem Vergleich von Betriebszuständen. Sollen sie für die Messung verwendet werden, so sind wenigstens Plausibilitätsprüfungen (Typenschilder der Verdichter; Drehzahl, etc) vorzunehmen. Häufig sind diese Geräte auf einen unbekanntem Systemzustand kalibriert, wodurch die angezeigten Werte sehr an Aussagekraft verlieren.

#### 4.1.3 Leistungsmessung

Auf einem Prüfstand oder im Labor ist die Ermittlung der elektrischen Antriebsleistung von Verdichtern kein Problem. Auf großtechnisch realisierten Kläranlagen werden häufig Leistungsmeßgeräte für einzelne Bereiche der Anlage vorgesehen. Hier stellen sich häufig zwei Fragen: Welche Verbraucher sind

angeschlossen, und ist der Ablesebereich ausreichend genau? Jedenfalls sollte geprüft werden, ob der Zähler steht, wenn die Belüftung abgestellt ist. Der Ablesebereich ist in der Regel für großen Energieverbrauch ausgelegt und daher für Kurzzeit-Messungen ungeeignet. Die Methode der Wahl ist hier die Feststellung der Wandlerkonstante WK in [A/A] und der Gerätekonstanten GK in [Umdrehungen/kWh] sowie die Ermittlung der Zeit t [s] für n Zählerimpulse. Daraus errechnet man mit folgender Beziehung die Momentanleistung.

$$P = \frac{WK \cdot n \cdot 3600}{GK \cdot t} \text{ [kW]} \quad \text{Gleichung 4-1}$$

Bei aufwendigeren Messungen sollte ein schreibendes Leistungsmeßgerät zum Einsatz gelangen. Die Aufzeichnung ist speziell bei Oberflächenbelüftern im Hinblick auf die Strömungsbildung aussagekräftig. Die Sauerstoffzufuhr von Oberflächenbelüftern ist von der Relativgeschwindigkeit des Belüfters und der Wasseroberfläche geprägt. Für aussagekräftige Ergebnisse ist daher wichtig, daß die Strömung sich im steady state befindet. Wenn bei der Leistungsaufnahme über der Belüftungszeit eine deutliche Veränderung eintritt, bedeutet das auch eine Änderung des Belüftungskoeffizienten. Solche Versuche sind in der Regel unbrauchbar. Dieses Problem tritt bei Umlaufbecken mit Rotorbelüftern stark in den Vordergrund. Hier dauert es oft mehrere Stunden, bis sich konstante Strömungsverhältnisse einstellen. Daraus ist ersichtlich, daß in der Regel die Chemikalieneinbringung unter jenen Bedingungen (Anzahl der laufenden Rotoren) erfolgen muß, die dann auch im Versuch vorhanden sind.

Bei der Leistungsmessung einzelner Antriebe mit der Wattmetermethode ist sorgfältig auf den Meßpunkt zu achten.

Bei Stern-Dreieckanlauf ist vor dem Hauptschütz zu messen. Da heute meist die Wicklungsenden in die Schaltwarte geführt werden und dort erst die Verschaltung durchgeführt wird besteht die Gefahr, daß man irgendwo innerhalb der Verschaltung mißt. Aufgrund der unübersichtlichen elektrischen Verhältnisse sind Fehlinterpretationen von Meßergebnissen unvermeidlich.

Ist der Antrieb mit einem Frequenzumformer ausgeführt, ist jedenfalls auf der Anspeisungsseite zu messen. Der Frequenzumformer hat erstens Verluste und erzeugt zweitens kein sinusförmiges Signal. Es ist nur mit eigens für diesen Zweck konstruierten Meßgeräten möglich, die Momentanwerte und Phasenlage der elektrischen Größen zu erfassen und einen brauchbaren Meßwert zu erhalten. Solche Meßgeräte stehen aber in der Regel nicht zur Verfügung.

Die Leistungsermittlung von direkt getriebenen Arbeitsmaschinen kann auch aus dem Gasverbrauch, der Laufzeit und dem Energieinhalt des Brennstoffes erfolgen. Die so ermittelten Werte liefern für den täglichen Anlagenbetrieb wichtige Informationen und sind zur Beurteilung von Betriebszuständen wichtig. Zur Überprüfung von Garantiewerten sind sie aber in der Regel zu ungenau. In diesem Fall ist es genauer, den Betriebszustand des Verdichters zu erfassen (Drehzahl, Stellung von Leitapparaten, Zustandsgrößen der ein und austretenden Luft, etc.) und aus dem Kennlinienfeld des Verdichters auf die Antriebsleistung rückzurechnen. Falls der Verdichter auf dem Prüfstand gelaufen ist und Abnahmeprotokolle existieren, kann noch eine Verbesserung der Genauigkeit durch Einrechnen der festgestellten Abweichungen erzielt werden.

#### 4.1.4 Wasserqualität

Hinsichtlich der Beschaffenheit des Wassers mit dem die Versuche durchgeführt werden ist auf ATV (1995) hinzuweisen. Wenn kein Wasser in Trinkwasserqualität verwendet wird, so ist auf den Salzgehalt zu achten und darauf ob es zu Komplexierung des Kobaltkatalysators kommt. Es hat sich in der Regel als günstig erwiesen Vorversuche mit dem zu verwendenden Wasser zu machen und zu kontrollieren, ob eine solche Komplexierung auftritt (ATV 1995). Auch die Ermittlung des Kobaltbedarfes kann entsprechend dem ATV Merkblatt erfolgen. Zur Charakterisierung wird empfohlen neben der Atmungsmessung auch Schlammparameter, Kohlenstoffparameter sowie Stickstoffwerte zu messen. Weitere Hinweise enthält das ATV Merkblatt (1995).

#### 4.1.5 Chemikalieneinbringung

Die Einbringung der Chemikalien zur Sauerstofffreimachung bzw. bei Desorptionsversuchen zur Aufhöhung des Sauerstoffgehaltes hat so gleichmäßig wie möglich zu erfolgen. Speziell bei Becken mit nicht vollständiger Längsdurchmischung wie z. B. großen Umlaufbecken ergeben sich hier Probleme. Ob das Natriumsulfit vorgelöst oder fest eingestreut wird, hat in der Regel keinen so großen Einfluß wie die Gleichmäßigkeit der Zugabe.

Bei der Messung der Sauerstoffzufuhr in Belebtschlamm muß verhindert werden, daß der Schlamm sedimentiert. Sind keine Rührwerke vorhanden ist dazu das Belüftungssystem einzuschalten. Dadurch wird wieder Sauerstoff eingetragen und der Zeitraum für das „Auszehren“ des Schlammes verlängert sich. Handelt es sich auch noch um ein Umlaufbecken mit Oberflächenbelüftern (Strömungsbildung) sind Desorptionsmessungen durchzuführen.

#### 4.1.5.1 Umlaufbecken

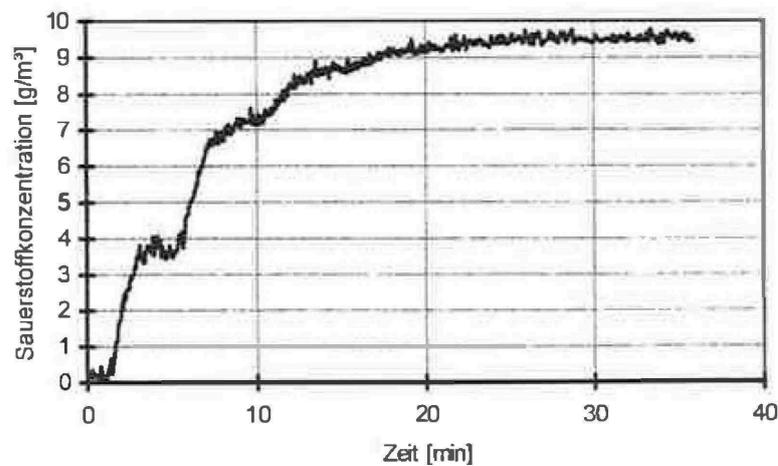
Bei Umlaufbecken ist bei der Zugabe der Desoxydationschemikalien mit großer Sorgfalt vorzugehen. Wenn periodische Schwankungen durch ungleichmäßige Chemikalienzugabe auftreten, so ist die Auswertung fehlerbehaftet. Das Weglassen von Werten am Beginn des Versuches ist, wenn Schwankungen auftreten, problematisch. Am Beispiel von drei verschiedenen Anlagen werden in Tabelle 4-1 die Auswerteergebnisse für den  $k_L a$  nach Weglassen der Wertepaare von 5% und 10 % der Versuchsdauer ( $2t_{90}$ ) angegeben.

**Tabelle 4-1:  $k_L a$ -Werte [ $h^{-1}$ ] in Abhängigkeit der weggelassenen Werte**

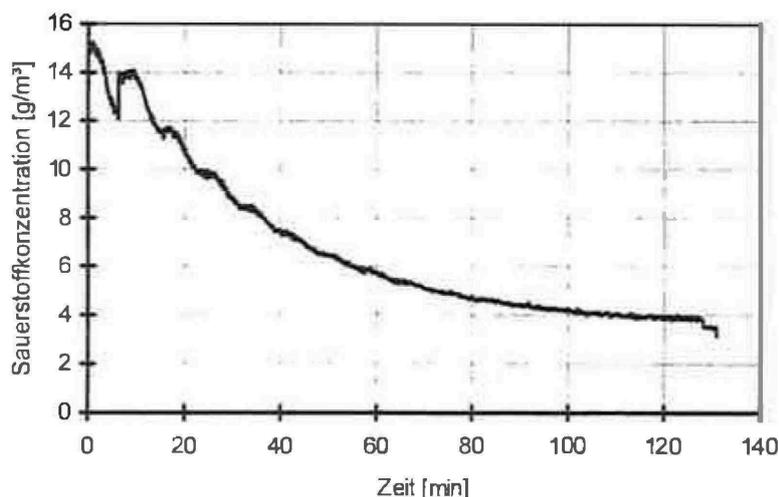
	Marckholsheim	Bludenz	Hohenau
0%	8,9	1,5	5,9
5%	9,3	1,9	6,0
10%	10,7	1,8	6,0

Je nach Startpunkt sind bei der „glatten“ Kurve (Anlage Hohenau) praktisch keine Abweichung des  $k_L a$  feststellbar, während bei den „welligen“ Kurven Unterschiede im  $k_L a$  bis 20% auftreten. Weitere Versuche auf der Anlage Marckholsheim haben gezeigt, daß der „wahre“ Wert etwa  $9,7 h^{-1}$  beträgt.

Anlage Marckholsheim: Reinwassermessung. Das Belebungsbecken dieser Anlage ist ein Umlaufbecken mit einer Gerinnebreite von 10 m und einer Beckenlänge von 100 m. Das Volumen beträgt bei einer Wassertiefe von 2,5 m etwa  $5000 m^3$ . Die Belüftung erfolgte während der Messung mit 9 Rotorbelüftern  $\varnothing 1$  m. Das Natriumsulfit wurde, während eines Wasserumlaufes, von den Brücken zugegeben. Der Anstieg des Sauerstoffgehaltes ist in Abbildung 4-1 dargestellt.



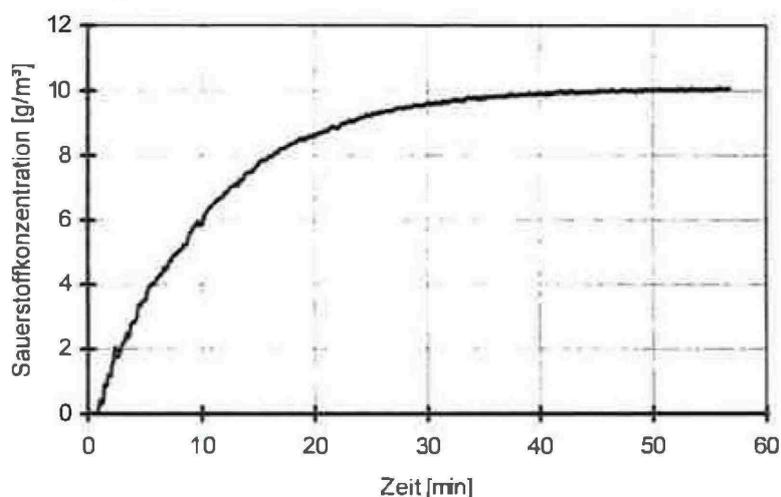
**Abbildung 4-1: Marckholsheim schlechte Sulfitverteilung**



**Abbildung 4-2: Bludenz, schlechte Einmischung von Wasserstoffperoxid**

Anlage Bludenz: Umlaufbecken mit 4000m<sup>3</sup> Beckenvolumen. Gerinnebreite: 4m, Beckentiefe 4,5m, Beckenlänge: 113m. Druckluftbelüftung in vier Feldern. Aufstockung des Sauerstoffgehaltes mit 35%-igem Wasserstoffperoxid. Die Messung erfolgte in Belebtschlamm (Abbildung 4-2).

Anlage Hohenau: Das Belebungsbecken dieser Anlage ist ein Umlaufbecken mit einer Gerinnebreite von 20 m und einer Beckenlänge von 155 m. Das Volumen beträgt bei einer Wassertiefe von 3 m etwa 19000m<sup>3</sup>. Die Belüftung erfolgt mit Rotorbelüftern Ø 1 m. Während der Reinwasser-Messung sind 16 Rotoren gelaufen. Die Zugabe des Natriumsulfits erfolgte von allen 12 Brücken während zweier Wasserumläufe. Die theoretische Überdeckung jedes Volumenelementes war also 24 fach. Der Anstieg des Sauerstoffgehaltes ist in Abbildung 4-3 dargestellt.



**Abbildung 4-3: Sauerstoffanstieg Hohenau gute Verteilung der Chemikalien**

Bei Anlagen mit örtlich konzentriertem Sauerstoffeintrag (punktförmiger Sauerstoffeintrag) ergibt sich, wenn die Durchmischung in Längsrichtung nur schwach ausgeprägt ist, eine Treppenkurve beim Auflüften. Die Auswertung ergibt hier, egal ob eine Hüllkurve oder alle Werte verwendet werden, den gleichen  $k_L a$ -Wert.

## **4.2 Maschinelle Ausrüstung**

### **4.2.1 Arbeitsmaschinen**

Vor der eigentlichen Messung sind Probeläufe der Maschinen durchzuführen. Dabei sind möglichst alle Betriebseinstellungen, die gemessen werden sollen, abzufahren, mindestens aber der Maximalwert. Während der Messung sollten die Gebläse in einem optimalen Betriebspunkt laufen. Eine Einflußnahme darauf ist in der Regel nur bei Strömungsverdichtern möglich. Auf manchen Anlagen sind Turboverdichter im Einsatz, die zwar verstellbare Leitapparate haben aber die Optimierungsregelung fehlt. Bei den Messungen wird in diesen Fällen folgendermaßen vorgegangen. Zunächst wird mit dem Verstelldiffusor (hinter dem Lauf-rad) die gewünschte Luftmenge eingestellt und anschließend der Leitapparat (vor dem Laufrad) so justiert, daß die Leistungsaufnahme ein Minimum wird. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis die Luftmenge der geforderten entspricht und die Leistungsaufnahme ein Minimum ist.

### **4.2.2 Wirtschaftlichkeit des Belüftungssystemes in Abhängigkeit des Betriebspunktes der Antriebsmaschinen**

Die Wirtschaftlichkeit eines Belüftungssystemes ist wesentlich von den Betriebspunkten der Antriebe und Arbeitsmaschinen abhängig. Jede Verstellmöglichkeit geht mit Einbußen an Wirkungsgrad einher. Die, aus der Sicht der Wirkungsgradabnahme, günstigste Drehzahlverstellmöglichkeit von Elektromotoren ist die polumschaltbare Ausführung. Sie würde heute aus den verschiedensten Gründen nicht mehr häufig eingesetzt (z.B. keine kontinuierliche Verstellmöglichkeit der Drehzahl). Beim Einsatz von Frequenzumformern ist einerseits mit elektrischen Verlusten (durch nicht sinusförmige elektrische Größen) zu rechnen, andererseits werden dadurch die Motoren höher thermisch belastet. In der Regel ist ein „größerer“ Antrieb zu wählen.

Dieser Sachverhalt soll an einem Beispiel erläutert werden. Bei stark schwankenden Gegendrücken, wie sie bei Abwasserreinigungsverfahren mit Wasserstandsänderungen (BATCH-Verfahren) auftreten, ist auf den Betriebspunkt der Antriebsmaschine zu achten. Bei variablem Wasserstand 30-100% (60-100%)

benötigt man bei einem Drittel des Wasserstandes in erster Näherung die dreifache Luftmenge um die gleiche Sauerstoffzufuhr zu erreichen. Ist der Antrieb ein E-Motor und die Arbeitsmaschine ein Kolbenverdichter, müßte die Drehzahl auf das dreifache (unrealistisch!) erhöht werden. Dabei sinkt das Drehmoment entsprechend ab. Die erreichten Wirkungsgrade einer solchen Anordnung wären sehr schlecht. Darüber hinaus ist festzuhalten, daß die maximale Drehzahlvariabilität mittels FU's bei 1:2 liegt. Damit ist auch die Luftmenge nur im Bereich 1:2 variabel. Der Betriebspunkt des Antriebes ist bei einer solchen Einstellung sehr ungünstig, wodurch die Leistungsaufnahme steigt und der Sauerstofftrag sinkt. Wird ein SBR mit Druckbelüftung ausgerüstet, so ist auf möglichst geringe Schwankungen des Wasserstandes zu achten. Diese Forderung bewirkt aber eine Erhöhung des Gesamtvolumens der Becken und schwächt die Konkurrenzfähigkeit des Verfahrens.

### **4.3 Fallbeispiele über die Konsequenzen aus Sauerstoffzufuhrmessungen**

Zur Veranschaulichung der Maßnahmen die aus den Resultaten von Sauerstoffzufuhrmessungen gezogen wurden, werden einige Fallbeispiele erläutert.

**Anlage Purgstall:** Die Anlage besteht aus zwei Längsbecken mit einer Beckenlänge von 36 m und einer Beckenbreite von 3,5 m. Für die Belüftung sind Plattenbelüfter eingesetzt, die die Beckensole zu 67 % abdecken. Zuzolge des Beckenquerschnittes und der vorgesehenen Belüfteranordnung kam es zu einer ausgeprägten Walzenströmung im Becken. Die Resultate waren deutlich unter den Erwartungen zurückgeblieben. Auf Basis dieser Meßresultate wurden die Belüfterplatten auf dem Beckenboden verschoben, wodurch die Walzenbildung gemindert wurde. Bei der Wiederholungsmessung wurden um ca. 25 % höhere Resultate erzielt. Bei der kleineren Luftmenge betrug die Verbesserung immer noch etwa 13 %. Durch diese einfache Maßnahme und die Kontrolle mittels der Sauerstoffzufuhrmessung konnten langfristig Energie und damit Betriebskosten eingespart werden.

**Anlage Bludenz:** In der ersten Ausbaustufe der Anlage wurde ein „schwächeres“ Belüftungssystem eingebaut, das im Bedarfsfall ertüchtigt werden sollte. Für die Sauerstoffversorgung waren die zwei Umlaufbecken (Beckenlänge 113 m, Beckentiefe 4,5 m, Gerinnebreite 4 m, Beckenvolumen 4000 m<sup>3</sup>) mit je 608 Stück Tellerbelüftern ausgerüstet. Im laufenden Betrieb zeigte sich eine massive Sauerstoffunterversorgung der Mikroorganismen. Es wurde daher ein Umbau vorgenommen und 1568 Stück Belüfterteller je Becken

eingebaut. Es wurden Messungen sowohl unter Betriebsbedingungen nach der Adsorptions- und Desorptionsmethode durchgeführt. Zuzufolge der nun möglichen größeren Absolutluftmenge aber auch bei gleicher Luftmenge (mit niedrigerer Beaufschlagung der einzelnen Belüfterelemente) konnten deutlich größere Werte (bis zu 25 %) erreicht werden. Welchen Einfluß die Abwasserzusammensetzung bzw. ein Unterschied in der Biozönose auf die Meßergebnisse hatte, konnte nicht festgestellt werden. Da die Messungen jedoch, nach einer entsprechenden Einarbeitungszeit, gleichzeitig innerhalb von 3 Tagen erfolgten, ist nicht mit einem Unterschied zuzufolge Abwasserzusammensetzung und Belebtschlammeneigenschaften zu rechnen. Auch hier konnte mit Hilfe der Messung der Sauerstoffzufuhr ein Mangel erkannt, und die Verbesserung bestätigt werden.

**Anlage Aschach:** Die Anlage Aschach besteht aus 2 Umlaufbecken mit einer Beckenlänge von 37 m und einer Gerinnebreite von 4,5 m. Die Wassertiefe beträgt ca. 8 m und das Beckenvolumen etwa 2500 m<sup>3</sup>. Die Belüftung erfolgt auf je einer Längsseite mit 24 Mischstrahldüsen. Die Düsen sind in je 2 Gruppen zu 8 und 16 Stück angeordnet. Die Messungen erfolgten in Reinwasser. Die erste Versuchsreihe zeigte eine deutlich hinter den Erwartungen zurückbleibende Sauerstoffzufuhr. Als erster Schritt wurden die Treibwasserpumpe der Düsen-Gruppe 2 (16 Düsen) verstärkt. Mit Hilfe der Sauerstoffeintragungsmessungen konnte dokumentiert werden, welche Verbesserung im Sauerstoffeintrag durch die jeweilige Modifikation am Belüftungssystem erzielt werden konnte.

#### **4.4 Erfahrungen mit Messungen in Belebtschlamm**

Bei Messungen unter Betriebsbedingungen im Belebtschlamm nach der Auflüftungsmethode ist darauf Bedacht zu nehmen, daß der Sauerstoffgehalt nicht unter 0,5 g/m<sup>3</sup> absinkt. Dadurch würde ein „Sättigungsdefizit“ entstehen, welches bei Inbetriebnahme der Belüftung zunächst eine höhere Atmung bewirkt, die erst langsam zurückgeht. Diese Veränderung der Atmung verursacht ein scheinbares Ansteigen des Sättigungswertes, wodurch die Auswertung fehlerbehaftet ist. Solche Versuche sind in der Regel unbrauchbar.

Die entscheidende Frage bei Messungen in Belebtschlamm ist also: „Kann die Aktivität der Mikroorganismen konstant gehalten werden?“ Darüber wurde schon in Kapitel 3.1 berichtet. Hier soll die Frage nach der Interpretation von Meßwerten nachgegangen werden, unter welchen Rahmenbedingungen die Sauerstoffzufuhr im Belebtschlamm größer ist als in Reinwasser. Das mögliche Auftreten eines Beschleunigungsfaktors wurde schon in Kapitel 2.3.3 angesprochen.

In der Literatur findet man vereinzelt Untersuchungsergebnisse, daß ein externer Aufnahmepfad für Sauerstoff existiert (BENETT, KEMPE 1965; REIBER, STENSEL 1985; ALBERTSON, DIGREGORIO 1975), bzw. daß Mikroorganismen Sauerstoff direkt aus der Luft aufnehmen. Der Stoffwechsel der Mikroorganismen erfolgt mittels Wasser als Transportmedium. Sowohl das Substrat, die abbaubaren Kohlenstoffverbindungen, Nährstoffe (N, P), als auch der für die aeroben Umsetzungen notwendige Sauerstoff werden in Wasser gelöst und von den Mikroorganismen aufgenommen. MÜLLER und STENSEL (1990) kommen zu dem Schluß, daß zufolge der stark unterschiedlichen Atmung im Becken und im Labortest Fehlinterpretationen über die Sauerstoffzufuhr gemacht wurden.

Die Beobachtung, daß unter Betriebsbedingungen die Sauerstoffzufuhr größer als im Reinwasser ist, ist mit Ausnahme der oben erläuterten Fälle, durch nicht korrekte Versuchsdurchführung, Nichtbeachtung von Randbedingungen und Fehlinterpretationen hervorgerufen.

Der oben angesprochene Sachverhalt wird anhand eines Fallbeispiels erläutert.:

Bei Sauerstoffzufuhrmessungen (nach der Auflüftungsmethode mit abgestelltem Abwasser und Rücklaufschlamm) auf einer betrieblichen Abwasserreinigungsanlage wurden unter Betriebsbedingungen Sauerstoffertragswerte von etwa 1 kg/kWh gemessen. Zum Vergleich wurden von der Ausrüsterfirma für das Belüftungssystem Sauerstoffzufuhrmessung unter folgenden Bedingungen durchgeführt:

- Die Sauerstoffzufuhr wurde über eine ein Gasbilanz ermittelt
- Es wurde Abwasser zwischengespeichert und während der Datenaufzeichnung eine sehr große Menge (etwa das 50-fache der normalen Beschickung) zugegeben.

Dadurch kam es zu einem Rückgang des Sauerstoffgehaltes auf 0 und zu einer deutlichen Erhöhung der Sauerstoffausnutzung der eingeblasenen Luft. Eine Erklärung dafür ist einerseits eine wesentliche Erhöhung der Atmung aber auch die Möglichkeit einer chemischen Oxidation von Abwasserinhaltsstoffen. Solche Versuchsbedingungen sind in der Abwassertechnik unüblich und entsprechen nicht dem Normalbetrieb einer Abwasserbehandlungsanlage. Die mit obiger Methoden ermittelten Meßwerte sind daher für den Normalbetrieb nicht aussagekräftig.

## **5. VERFAHRENSTECHNISCHE AUSWERTUNG**

Um eine allgemeinen Beschreibung der Sauerstoffzufuhr in einer Belebungsanlage zu ermöglichen, wird eine Formulierung des Stofftausches in dimensionsloser Form angestrebt. Dazu ist es erforderlich abzuklären, ob mit den Meßwerten, die mit den in der Abwassertechnik üblichen Methoden (Kapitel 3.1) und Auswerteverfahren (Kapitel 3.2) erhalten werden, direkt verfahrenstechnische Kennzahlen berechnet werden können. Dazu sind die Resultate der Versuche darauf zu prüfen, ob mit ihnen die Beschreibung eines aktuellen Systemzustandes möglich ist. Aus den Ergebnissen dieser Überprüfung werden Maßnahmen zur Umrechnung abgeleitet.

Bei der Berechnung der Sauerstoffzufuhr wurde oftmals die Frage nach der, den Stofftauschvorgang am besten beschreibenden, Konzentrationsdifferenz aufgeworfen. Prinzipiell ist zwischen zwei Betrachtungsweisen zu unterscheiden:

- Es ist ein maximal möglicher Stofftransport unter festgelegten Standardbedingungen zu ermitteln. Dieser wird nach einer standardisierten Methode berechnet (Gleichung 3-2). Diese Sauerstoffzufuhr dient in erster Linie Vergleichs- und Kontrollzwecken. Die in den Berechnungen eingesetzte Konzentrationsdifferenz wird per Definition (Kapitel 3.3) aus  $\Delta c_{\max} =$  (Sättigungswert zu Versuchsende - 0) berechnet.
- Es wird der tatsächlich auftretende Stofftransport unter Berücksichtigung der herrschenden Versuchsbedingungen unter Berücksichtigung aller Randbedingungen ermittelt. Hier ist die tatsächlich auftretende Konzentrationsdifferenz zu ermitteln und die Bestimmungsmethode des Belüftungskoeffizienten zu hinterfragen.

### **5.1 Sauerstoffpartialdruck im Gas und Sauerstoffgehalt der Flüssigphase in Abhängigkeit von der Wassertiefe**

Zur Erläuterung der Zusammenhänge wird das Konzentrationsprofil des Sauerstoffpartialdrucks in der Gasphase und des Sauerstoffgehaltes in der Flüssigphase über der Wassertiefe dargestellt (Abbildung 5-1). Die Abhängigkeit der Sauerstoffausnutzung von der Wassertiefe wurde von PÖPEL und WAGNER (1994) dargestellt. Für die Berechnungen ist die Festlegung eines Stoffübergangswertes erforderlich. Damit können die örtlichen Sauerstoffausnutzungen berechnet werden. Durch Summierung der örtlichen Ausnutzung bis zur jeweils betrachteten Wassertiefe ist es nun möglich, den Partialdruck des Sauerstoffs in

der Gasphase in Abhängigkeit der Wassertiefe zu berechnen. Über das Henry'sche Gesetz wird mit den örtlichen Partialdrücken der örtliche Sättigungswert bestimmt. Wird die Flüssigphase vollständig durchmischt und die Gasphase als Propfenströmung betrachtet, so kann man den örtlichen Sättigungswert über die Wassertiefe mitteln und erhält den mittleren Sättigungswert  $c''$  in Abhängigkeit der mittleren Sauerstoffausnutzung.

Die Konzentrationsprofile gelten für den „steady state“ Betrieb, d.h. es treten keine zeitlichen Veränderungen mehr auf (Zeitpunkt  $t \rightarrow \infty$ ). Es werden zwei Fälle unterschieden:

- Die mittlere Sauerstoffausnutzung beträgt  $\eta = \underline{3\%/m}$ . Dies ist nur möglich, wenn ein Sauerstoffverbrauch auftritt. Die mittlere Sauerstoffausnutzung (bezogen auf die Wassertiefe  $H$ ) beträgt

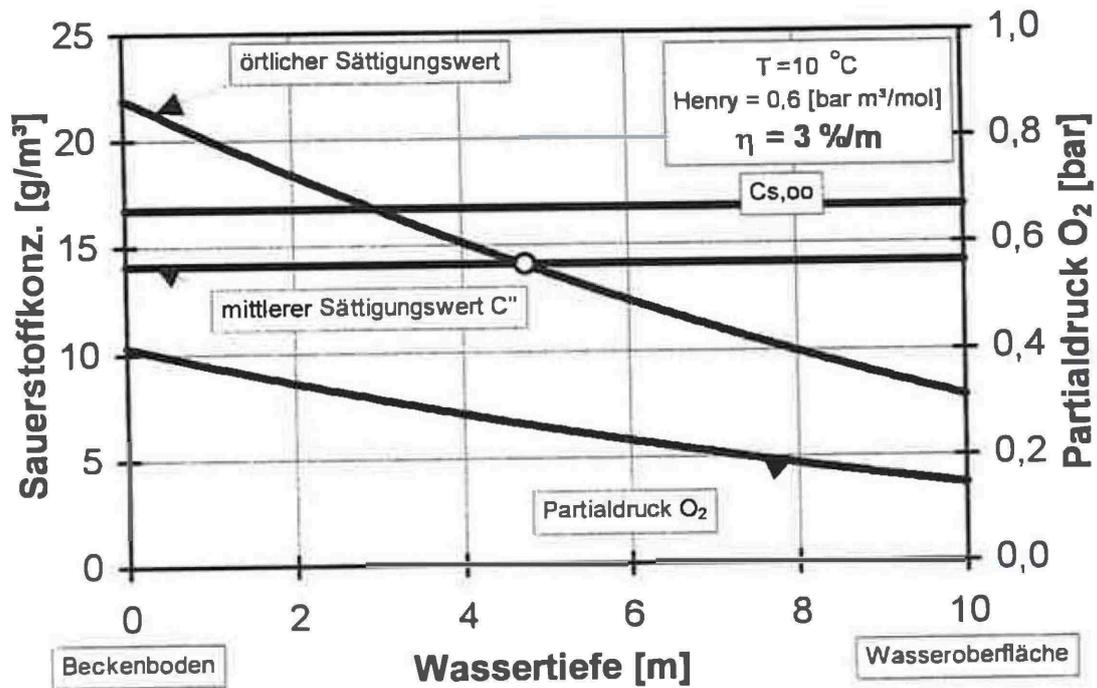
$$\eta = \frac{k_L a^* \Delta c}{x' \cdot \rho_L \cdot H \cdot q_{LN}}$$

Gleichung 5-1

Darin ist  $x'$  der Sauerstoffmolenbruch der eintretenden Luft,  $\rho_L$  die Dichte von Sauerstoff und  $H$  die Wassertiefe. Der Luftvolumenstrom  $q_{LN}$  ist auf das Beckenvolumen bezogen. Mit den hier gültigen Randbedingungen kann  $\Delta c$  als  $(c'' - c^*)$  formuliert werden (siehe auch Abbildung 3-1). Der „mittlere Sättigungswert“  $c''$  ist der über die Wassertiefe gemittelte „örtliche Sättigungswert“ (vergleiche Abbildung 5-1).

Daraus ist ersichtlich, daß es für die Sauerstoffausnutzung nicht von Bedeutung ist, welchen Zahlenwert der „virtuelle Sättigungswert“  $c^*$  annimmt. Beim Betrieb von Belebungsanlagen wird in aeroben Beckenbereichen in der Regel ein Sauerstoffgehalt  $c^* \leq 2 \text{g/m}^3$  angestrebt. Es muß nur eine praxisgerechte Kombination von  $k_L a / q_{LN}$  (aus unendlich vielen) gewählt werden, die der gegebenen Ausnutzung nach Gleichung 5-1 genügt. Damit ist Abbildung 5-1 unabhängig vom Zahlenwert von  $c^*$  gültig.

Man erkennt den gekrümmten Verlauf des  $O_2$ -Partialdruckes zufolge des etwas höheren Stofftausches in der Tiefe. Wie erwartet ist  $c''$  aufgrund der Sauerstoffausnutzung deutlich geringer als der auf den Partialdruck in halber Einblastiefe bezogene  $c_{s,\infty}$ .



**Abbildung 5-1: Sauerstoffgehalt und Partialdruck (bei  $\eta = 3 \%$ ) in Abhängigkeit der Wassertiefe**

Mit der Vorgabe von Zahlenwerten für den Belüftungskoeffizienten  $k_L a$  oder des spezifischen Luftdurchsatzes kann man die örtlichen Stoffströme bestimmen. Sie errechnen sich aus dem Produkt des  $k_L a$  mal den örtlichen Konzentrationsdifferenzen. Die örtlichen Konzentrationsdifferenzen sind  $\Delta c_{\text{örtlich}} = (c'' - \text{örtlicher Sättigungswert})$ . Man erkennt, daß in der unteren Beckenhälfte der „örtliche Sättigungswert“ größer als  $c''$  ist, es findet also ein Stofftransport von der Gasphase in die Flüssigphase statt. Nach dem Schnittpunkt des örtlichen Sättigungswertes mit  $c''$  wird der „örtliche Sättigungswert“ kleiner als  $c''$ , es wird also Sauerstoff wieder in die Gasphase zurück transportiert.

Eine mittlere treibende Konzentrationsdifferenz kann zu  $\Delta c = c'' - c^*$  gebildet werden. Diese ist fast zahlengleich der „mittleren logarithmischen Differenz“ nach Gleichung 5-11. Bei Einsatz eines guten Belüftungssystems kann bei Normalbetrieb auf einer Kläranlage eine Sauerstoffausnutzung von 3%/m und ein Sauerstoffgehalt von  $c^* = 2 \text{ g/m}^3$  erreicht werden. Mit diesen Werten ist das Beispiel in Abbildung 5-1 durchgerechnet. Man erhält das Resultat, daß  $\Delta c_{\text{log}}$  etwa 3% kleiner als  $(c'' - c^*)$  ist. Daraus ist zu folgern, daß der Stoffaustauschvorgang durch beide Konzentrationsdifferenzen gut beschrieben wird.

○ Die mittlere Sauerstoffausnutzung beträgt  $\eta = 0\%/m$ . Das bedeutet es tritt kein Sauerstoffverbrauch auf (Reinwasser). Daraus ist aber auch abzuleiten, daß  $\Delta c$  gleich Null ist. Der „mittlere Sättigungswert“  $c'$  ist also gleich dem sich bei  $t \rightarrow \infty$  einstellenden Sättigungswert in Reinwasser  $c_{s,oo}$ . Im Fall der Reinwassermessung Abbildung 5-2 erkennt man den linearen Verlauf des  $O_2$  Partialdruckes zufolge des abnehmenden hydrostatischen Druckes. Man kann an diesem Beispiel erkennen, daß es sich bei dem sich einstellenden Sauerstoffgehalt  $c_{s,oo}$  um einen dynamischen Gleichgewichtswert handelt. Die Umkehrung der Transportrichtung für den Sauerstoff tritt hier beim Schnittpunkt des örtlichen Sättigungswertes mit  $c_{s,oo}$  ein.

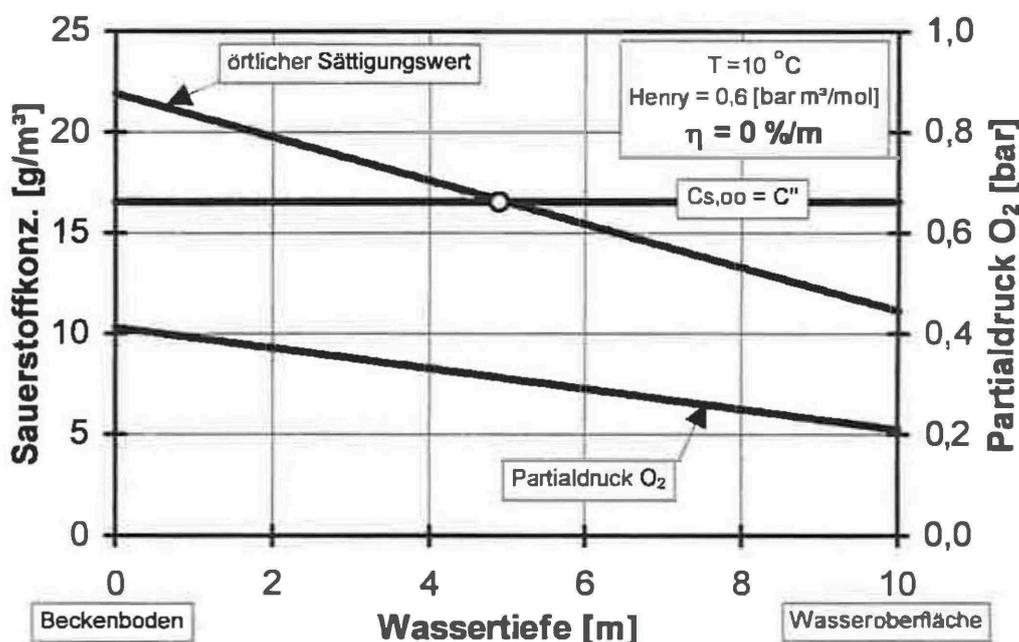


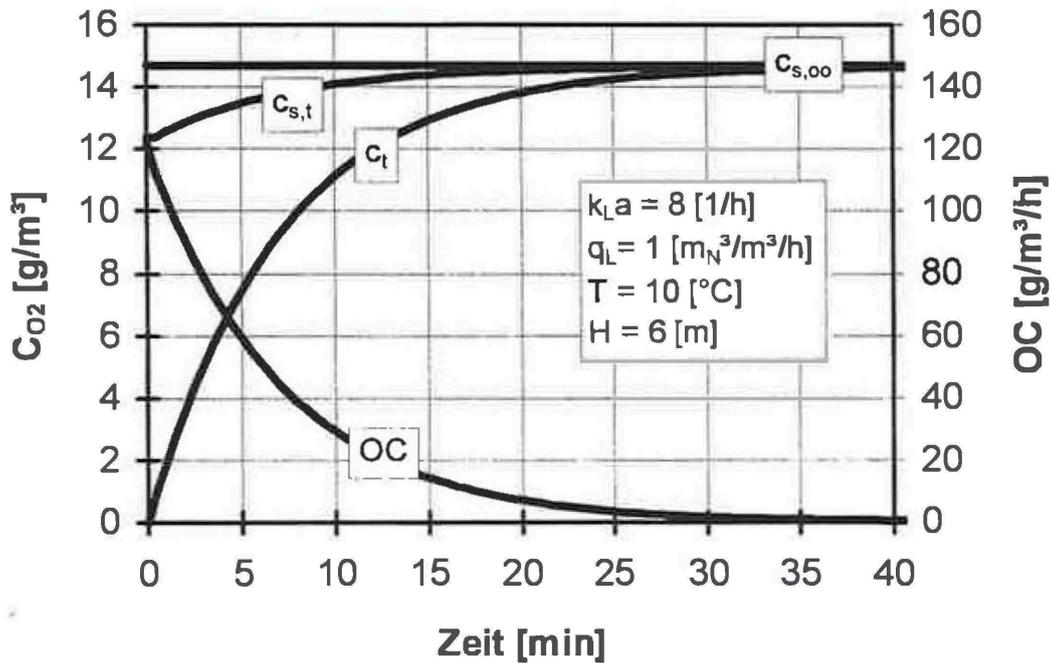
Abbildung 5-2: Sauerstoffgehalt und Partialdruck (bei  $\eta = 0\%$ ) in Abhängigkeit der Wassertiefe

## 5.2 Berechnung des variablen Sättigungswertes $c_{s,t}$ zum Zeitpunkt $t=0$ , und des „wahren $k_a$ “

Im vorigen Kapitel wurde die Veränderungen des möglichen Sättigungswertes in Abhängigkeit der Wassertiefe unter „steady state“-Bedingungen dargestellt. Bei den Versuchen verändern sich aber die Konzentrationen über der Belüftungszeit. Die Sättigungskonzentration ist daher eine zeitlich und über die Wassertiefe variable Größe.

Die Verhältnisse sind in der Abbildung 5-3 zusammengestellt. Der dargestellte Konzentrationsverlauf ist für Reinwasser und Belebtschlamm (es ist statt  $c_{s,oo} \rightarrow c^*$  zu setzen) gültig. Nach den Ausführungen in Kapitel 5.1 ist  $c_{s,t}$  der mittlere

Sättigungswert  $c^*$  aber nun für eine abnehmende Sauerstoffausnutzung ( $\eta = \eta_t$ , diese ist zum Zeitpunkt  $t=0$ ,  $c_t=0$  naturgemäß am größten) formuliert.



**Abbildung 5-3: Variabler Sättigungswert zufolge Sauerstoffausnutzung in Reinwasser**

Der Gleichgewichtswert für den Sauerstoffgehalt ( $c_{s,t} = c^*_t$ ) wird, in Folge der abnehmenden Sauerstoffausnutzung, vom Zeitpunkt ( $t=0$ )  $t_0$  bis zum Zeitpunkt ( $t \rightarrow \infty$ )  $t_\infty$  größer. Zum Zeitpunkt  $t_\infty$  hat die ein- und austretende Gasphase den gleichen Molenbruch in Bezug auf den enthaltenen Sauerstoff. Es stellt sich ein Sättigungswert, in Reinwasser nach Gleichung 3-3 ein In Belebtschlamm stellt sich der „virtuellen Sättigungswert“  $c^*$  ein. Den „virtuellen Sättigungswert“  $c^*$  kann man aus folgender Beziehung  $c^* = c_{s,\infty} - \frac{OV}{k_La}$  berechnen (Abbildung 3-1).

Nach der Definition für die Sauerstoffzufuhr wird die maximale Konzentrationsdifferenz gleich dem Versuchsendwert ( $c_{s,\infty} - 0$ ) gesetzt. Wie aus Abbildung 5-3 zu erkennen ist, ist  $(c_{s,\infty} - 0) > (c_{s,t=0} - 0)$  und daher

$$OC = k_La * (c_{s,\infty} - 0) > k_La * (c_{s,t=0} - 0).$$

An dieser Stelle ist ein Rückblick auf die Gleichung 3-1 angebracht. Dort wird  $c_s = c_{s,\infty} = \text{konstant}$  angenommen. Die Ermittlung des  $k_La$  beruht daher auf Sättigungsdefiziten  $\Delta c = (c_{s,\infty} - c_t)$  die real nicht auftreten. Tatsächlich sind die Konzentrationsdifferenzen  $\Delta c = (c_{s,t} - c_t)$  maßgeblich für die Sauerstoffzufuhr. Damit wird offensichtlich, daß das Steigen von  $c_{s,t}$  das Resultat des Auswerte-

algorithmus für  $k_{La}$  beeinflußt. Analoge Aussagen gelten für Messungen in Belebtschlamm. KAYSER (1967) hat diese Frage auf Basis der Arbeit von DOWNING und BOON (1963) für den allgemeinen Betriebsfall bearbeitet. Ausgehend von der Gleichung 3-1, formuliert KAYSER (1967) mit einem zeitabhängigen Sättigungswert

$$\frac{dc}{dt} = \text{„}k_{La}\text{-wahr“} * (c_{s,t} - c) \quad \text{Gleichung 5-2}$$

sowie der Massenbilanz für den Sauerstoff (Annahme:  $q_L = \text{konstant}$ )

$$\frac{dc}{dt} = q_L * \rho * (x' - x_t'') \quad \text{Gleichung 5-3}$$

und der Proportionalität der Molenbrüche mit dem möglichen Sättigungswert nach Gleichung 5-4, ( $x'$  und  $x_t''$  sind der Molenbruch des Sauerstoffes an der Stelle des Gaseintrittes und der Stelle des Gasaustrittes) werden „ $k_{La}$ -wahr“ und der zugehörige Sättigungswert ( $c_{s,t=0}$ ) zum **Zeitpunkt  $t=0$ ;  $c_t=0$**  berechnet.

In Ergänzung zum Berechnungsgang von KAYSER (1967) wurden in der vorliegenden Arbeit in den Ansatz für die Proportionalität zwischen den Molenbrüchen  $x'$  und  $x_t''$  und dem Sättigungswert die entsprechenden Partialdrücke eingeführt, damit gilt das „Henry'sche Gesetz“:

$$\frac{c_{s,t}}{x' * \pi_{h=H} + x_t'' * \pi_{h=0}} = \frac{c_{s,00}}{x' * (\pi_{h=H} + \pi_{h=0})} \quad \text{Gleichung 5-4}$$

Darin ist  $\pi$  der Druck (in bar) an der jeweils betrachteten Stelle im Becken. Er berechnet sich zu:

$$\pi = 1 + 0,1 * h \quad \text{Gleichung 5-5}$$

Die Laufvariable  $h$  für die Wassertiefe wird von der Wasseroberfläche nach unten positiv festgelegt. In der Gleichung 5-4 wird zur Berechnung eines mittleren Partialdruckes der arithmetischen Mittelwert verwendet. In Anlehnung an die Vorgangsweise in der Verfahrenstechnik wäre es besser die „mittlere logarithmische Differenz“ zu verwenden. Leider ist dann keine geschlossene Lösung des Problems mehr möglich.

Nach entsprechender Umformung obiger Gleichungen ergibt sich für den „wahren  $k_{La}$ “ folgende Bestimmungsgleichung:

$$\text{„}k_{La}\text{-wahr“} = \frac{k_{La}}{1 - k_{La} * c_{s,00} * F} \quad \text{Gleichung 5-6}$$

$$F = \frac{\pi_{h=0}}{(\pi_{h=H} + \pi_{h=0}) * X' * \rho_L * q_L} \quad \text{Gleichung 5-7}$$

durch entsprechende Umformung ist auch die Gleichgewichtskonzentration zum Zeitpunkt t=0 berechenbar, sie ergibt sich zu:

$$c_{s,t=0} = \frac{c_{s,00}}{1 + k_{La}\text{-wahr} * c_{s,00} * F} \quad \text{Gleichung 5-8}$$

Obige Beziehungen gelten für Reinwasser und analog für Belebtschlamm. KAYSER (1967) kommt, anhand von Zahlenbeispielen zu dem Schluß, daß die Produkte  $k_{La} * (c_{s,00} - 0)$  und  $k_{La}\text{-wahr} * (c_{s,t=0} - 0)$  sich nur geringfügig unterscheiden. Die fehlende Druckkorrektur bei der Berechnung des mittleren Partialdruckes hat auf diese Aussage keinen Einfluß, sie verschiebt lediglich die Zahlenwerte für „ $k_{La}\text{-wahr}$ “ und  $c_{s,0}$ .

Anhand obiger Gleichungen kann leicht gezeigt werden, daß gilt

$$k_{La} * (c_{s,00} - 0) = k_{La}\text{-wahr} * (c_{s,t=0} - 0) \quad \text{Gleichung 5-9}$$

Das Produkt „wahrer  $k_{La}$ “-Wert mal der Konzentrationsdifferenz  $(c_{s,t=0} - 0)$  ist **gleich** dem nach dem in der Abwassertechnik üblichen Verfahren ermittelten  $k_{La}$ -Wert mal dem Sättigungswert bei Versuchsende. Die Diskussionen, welche Konzentrationsdifferenz für die Berechnung der Sauerstoffzufuhr herangezogen werden soll, sind für die Praxis der Sauerstoffzufuhrmessung daher nicht von Bedeutung.

Der zahlenwertmäßige Unterschied von  $k_{La}$  zu „ $k_{La}\text{-wahr}$ “ und  $c_{s,00}$  zu  $c_{s,0}$  ist von der Luftmenge und damit der Luftausnutzung abhängig. Wie schon KAYSER (1967) festgestellt hat, ist mit einer größer werdenden Veränderung zu rechnen, je geringer die Luftmenge und damit je größer die Ausnutzung ist.

Das Beispiel aus Abbildung 5-3 liefert, für  $t=0$ ;  $c_t=0$ , mit den obigen Beziehungen für  $q_{LN}=1 \text{ m}^3\text{N}/\text{m}^3/\text{h}$  folgende Werte:

**Tabelle 5-1: Vergleich Belüftungskoeffizient und Sättigungswert**

$q_{LN}$	$k_{La}$	$k_{La}\text{-wahr}$	$c_{s,00}$	$c_{s,0}$	$k_{La} * c_{s,00}$	$k_{La}\text{-wahr} * c_{s,0}$
$\text{m}_\text{N}^3/\text{m}^3/\text{h}$	[1/h]	[h <sup>-1</sup> ]	[g/m <sup>3</sup> ]	[g/m <sup>3</sup> ]	[g/m <sup>3</sup> /h]	[g/m <sup>3</sup> /h]
1,0	8,00	9,42	14,68	12,47	117,4	117,4

Führt man in Gleichung 5-9 statt  $c_{s,0}$  den zeitlich veränderlichen  $c_{s,t}$  ein, kann man anhand eines Zahlenbeispiels feststellen, daß auch die folgende Beziehung gilt.

$$k_{La} * (c_{s,\infty} - c_t) = k_{La-wahr} * (c_{s,t} - c_t)$$

Für die Berechnung der Sauerstoffzufuhr, zu einem beliebigen Zeitpunkt  $t > 0$ ;  $c = c_t$ , wurde  $c_{s,t}$  ausgehend von  $t=0$  und  $c=0$  schrittweise hochgerechnet. Die Rechnung wurde mit den Werten aus Abbildung 5-3 ausgeführt.

Daraus kann gefolgert werden, daß bei Verwendung der korrespondierenden Werte für den Belüftungskoeffizient und die Konzentrationsdifferenz die aktuelle Sauerstoffzufuhr mit beiden Produkten beschrieben werden kann.

### 5.2.1 Vergleich des variablen Sättigungswertes $c_{s,0}$ und der „mittleren logarithmischen Differenz“ $\Delta c_{log}$

Bei der Bildung dimensionsloser Kennzahlen aus den Versuchsdaten wird in den Berechnungen häufig eine, den Stofftauschvorgang beschreibende, Konzentrationsdifferenz benötigt. Mit  $(c_{s,0} - 0)$  aus der Gleichung 5-8 steht eine Differenz für den Zeitpunkt  $t=0$  zur Verfügung. Führt man die Sauerstoffausnutzung  $\eta$  [g/g/m] nach Gleichung 5-1 und  $c_{s,\infty}$  nach Gleichung 3-3 ein kann man Gleichung 5-8 folgendermaßen schreiben:

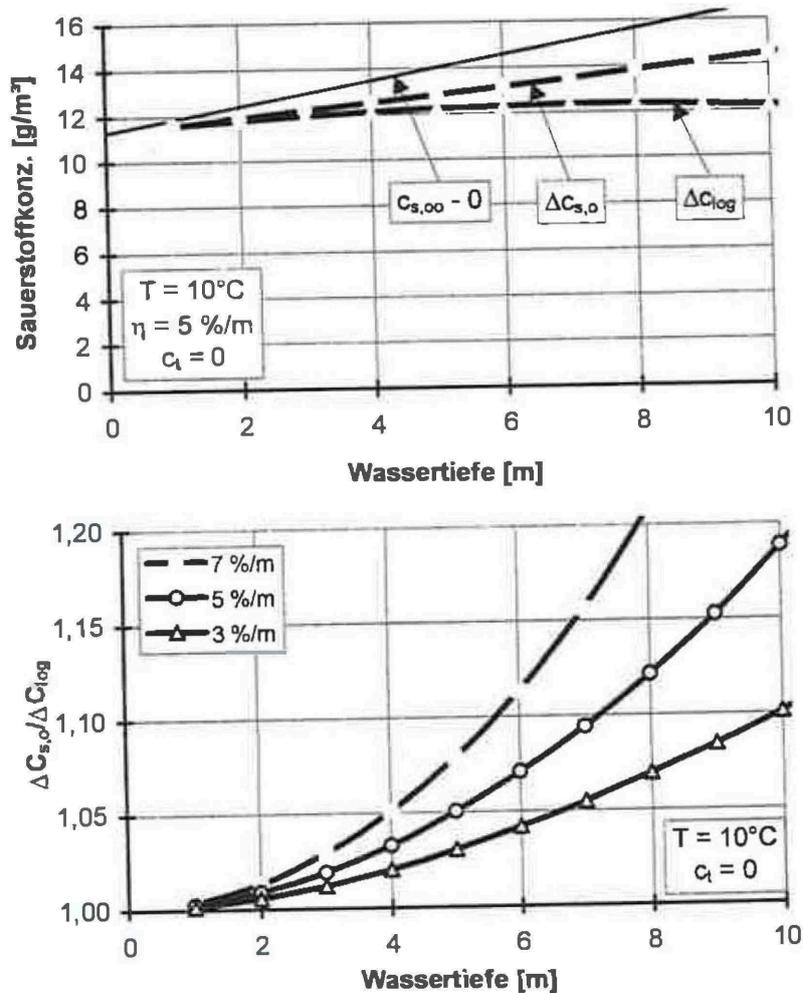
$$\Delta c_{s,0} = (c_{s,t=0} - 0) = c_s * \frac{\pi_{H/2} * (\pi_H + \pi_0)}{\pi_H + \pi_0 * (1 + \eta * H)} \quad \text{Gleichung 5-10}$$

In der Verfahrenstechnik werden variable Differenzen üblicherweise mit einer „mittleren logarithmischen Differenz“ dargestellt. Im Folgenden wird ein Vergleich zwischen der nach Gleichung 5-10 bestimmten Konzentrationsdifferenz und der „mittleren logarithmischen Konzentrationsdifferenz“ angestellt. Allgemein kann  $\Delta c_{log}$  nach folgender Gleichung berechnet werden

$$\Delta c_{log} = c_s * \frac{\pi_H - \pi_0 * (1 - \eta * H)}{\ln \frac{c_s * \pi_H - c}{c_s * \pi_0 * (1 - \eta * H) - c}} \quad \text{Gleichung 5-11}$$

Für den Vergleich mit Gleichung 5-10 ist für  $c=0$  zu setzen. Unter  $c_s$  ist der Sättigungswert bei der betrachteten Temperatur und 1,013 bar zu verstehen.

In der folgenden Abbildung 5-4 ist  $\Delta c_{s,0}$  und die „mittlere logarithmische Differenz“  $\Delta c_{log}$  anhand eines Zahlenbeispiels für den Versuchsbeginn  $t=0$ ,  $c=0$  dargestellt. Zum Vergleich wurde auch  $(c_{s,\infty} - 0)$  eingetragen.



**Abbildung 5-4: Vergleich der mittleren logarithmischen Konzentrationsdifferenz und der Konzentrationsdifferenz  $\Delta c_{s,0} = c_{s,t=0}$**

Im unteren Teil der Abbildung 5-4 wurde  $\Delta c_{s,0}$  auf  $\Delta c_{log}$  bezogen. Bei Wassertiefen von 4 bis 8 m ist mit einer Abweichung von 3 - 20% je nach Sauerstoffausnutzung zu rechnen. Es zeigt sich, daß mit steigender Ausnutzung und zunehmender Wassertiefe die maximale Konzentrationsdifferenz kleiner wird. Für die Berechnung verfahrenstechnischer Kennzahlen, in denen eine charakteristische Konzentrationsdifferenz benötigt wird, wird daher  $\Delta c_{log}$  eingesetzt.

### 5.3 Gasbelastung, Gaseschwindigkeit und Belegungsdichte

Die Beaufschlagung der einzelnen Belüfterelemente ist bei den heute üblichen, flächendeckend angeordneten Druckbelüftungssystemen ein wesentlicher Parameter. Hier war es in der Vergangenheit üblich, den Luftvolumenstrom pro Belüfter oder Meter anzugeben. Aus Gründen der Vergleichbarkeit hat es sich als günstiger erwiesen, die Luftmenge auf die abgasende Belüfterfläche zu beziehen, wobei bei Rohrbelüftern die komplette Mantelfläche berücksichtigt wird.

Einen weiteren Parameter stellt die Belegung (i.A. die Zahl der Belüfter pro Bodenfläche) dar.

Es werden zunächst einige Definitionen gegeben:

**Gasgeschwindigkeit  $v_g$  [m/h]:** Darunter wird die Gasleerrohrgeschwindigkeit verstanden, sie berechnet sich zu

$$v_g \text{ [m/h]} = \frac{\text{Luftvolumenstrom } Q_L \text{ [m}^3\text{/h]}}{\text{Beckengrundfläche [m}^2\text{]}} = q_L \text{ [m}^3\text{/m}^2\text{/h]} * H \text{ [m]} \quad \text{Gleichung 5-12}$$

Für die Beschreibung des Belüftungsvorganges ist es sinnvoll den Volumenstrom  $q_L$  auf die halbe Einblastiefe zu beziehen. Bei Becken die an der Beckensohle nur teilweise mit Belüftern ausgerüstet sind, ist diese Definition nur eingeschränkt brauchbar. Bei den Auswertungen der Messungen wird darauf noch eingegangen.

**Gasbelastung  $v_b$  [m/h]:** Dieser Wert charakterisiert die Austrittsgeschwindigkeit der Luft aus dem Gaszerteiler (Belüfterelement), er berechnet sich zu:

$$v_b \text{ [m/h]} = \frac{\text{Luftvolumenstrom [m}_N^3\text{/h]}}{\text{Gaszerteileroberfläche [m}^2\text{]}} = \frac{q_{LN} \text{ [m}_N^3\text{/m}^2\text{/h]} * H \text{ [m]}}{BD \text{ [m}^2\text{/m}^2\text{]}} \quad \text{Gleichung 5-13}$$

Richtigerweise müßte der Luftvolumenstrom auf die an der Austrittsstelle herrschenden Zustandsgrößen der Luft umgerechnet werden. Bei den üblichen Wassertiefen und Verdichteraggregaten (5-8m und  $\Delta T_{\text{Verdichtung}}=50-80^\circ\text{C}$ ) ergibt sich der Umrechnungsfaktor zu etwa 0,75. Die Austrittstemperatur aus dem Gaszerteiler ist aber unbekannt. Es wird daher auf eine Umrechnung verzichtet. Im Schrifttum ist es gebräuchlich, den Luftvolumenstrom auf Normbedingungen zu beziehen, aus Gründen der Vergleichbarkeit werden für die Berechnung der Gasbelastung auch Normbedingungen angenommen.

Mit steigendem Luftdurchsatz steigt der Druckverlust im Gaszerteiler, das bedeutet der Druck innerhalb des Belüfters steigt. Bei allen mit flexiblen Membranen ausgestatteten Gaszerteilern ist mit einer größeren Dehnung der Membran und damit einer Veränderung der Austrittsöffnungen zu rechnen. Damit wird ersichtlich, daß mit der Gasbelastung auch die Blasengrößenverteilung charakterisiert wird. Auch bei starr porösen Gaszerteilern ergeben sich mit steigender Gasbelastung Veränderungen. Es wird sich die Ablösefrequenz der Blasen verändern und es können zusätzliche Poren, die einen höheren Druckverlust haben, zu gasen beginnen.

**Belegungsdichte BD [m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]:** Diese Größe beschreibt den Anteil der Gaszerteileroberfläche bezogen auf die Beckengrundfläche. Sie bestimmt sich aus:

$$BD [m^2/m^2] = \frac{\text{Gaszerteileroberfläche [m}^2\text{]}}{\text{Beckengrundfläche [m}^2\text{]}} \quad \text{Gleichung 5-14}$$

Bei Umlaufbecken, mit nur teilweiser Belegung der Beckensohle, ist die Aussagekraft dieses Parameters eingeschränkt.

Unter Beachtung der unterschiedlichen Zustandsgrößen der Luft kann die Gasbelastung in die Gasgeschwindigkeit umgerechnet werden.

$$v_g = v_b \cdot BD \cdot (1 + 0,05 \cdot ET) \quad \text{Gleichung 5-15}$$

Mit der Definition der Belegungsdichte wird zwar die Quantität der Gaszerteiler im Becken beschrieben über die „Qualität einer Belüfteraufteilung“ gibt sie jedoch keine Auskunft. Die von KAYSER 1991 aufgeworfene Frage: „Welche Anordnung ist noch als flächig anzusprechen?“ kann mit der Belegungsdichte nicht beantwortet werden. Hier könnte die Einführung eines „Gleichverteilungs-Faktors“ Abhilfe schaffen. Eine Definition könnte lauten:

$$GF = \frac{A_{\max}}{A_{\min}} \quad \text{Gleichung 5-16}$$

Worin  $A_{\max}$  die Fläche des größten und  $A_{\min}$  die des kleinsten zwischen zwei Gaszerteiler einzeichnenbaren Kreises ist.

### 5.3.1 Einflüsse auf die Strömung im Bereich der Gaszerteiler

Es ist bekannt, daß zufolge der Einschnürung des Blasenschwarmes eine Verringerung des Sauerstoffüberganges eintritt (ZLOKARNIK 1980c). Es liegt daher die Überlegung nahe, daß eine Abhängigkeit der Sauerstoffzufuhr vom Verhältnis abgasende Fläche zum Umfang des Gaszerteilers auftritt. Je größer dieses Verhältnis ist, desto mehr Möglichkeiten zur Einschnürung bzw. zur Ausbildung von Strömungswalzen sind vorhanden. Dadurch wird die Aufenthaltszeit der Blasen im Belebungsbecken verkürzt, damit wird auch die Sauerstoffzufuhr verringert. Die Strömung wird auch vom Abstand zum Boden beeinflusst. Plattenbelüfter, die unmittelbar am Beckenboden montierte sind, bedingen ein anderes Strömungsprofil als Tellerbelüfter oder Rohrbelüfter, die 40cm über dem Beckenboden angeordnet sind. Es wird der Versuch unternommen, die Umströmung der Belüfter zu charakterisieren. Dazu wird das Verhältnis abgasende Fläche zu Umfang des Belüfters gebildet. Dieses Verhältnis ist von der Belüftergeometrie abhängig. Es liegt für Plattenbelüfter in der Größenordnung

von etwa  $0,4 \text{ m}^2/\text{m}$  Umfang, für Tellerbelüfter je nach Durchmesser in der Größenordnung von  $0,04 \text{ m}^2/\text{m}$  Umfang und für Rohrbelüfter bei etwa  $0,1 \text{ m}^2/\text{m}$  Umfang. Bei Rohrbelüftern wird als abgasende Fläche die gesamte Mantelfläche und als Umfang das projizierte Rechteck eingesetzt. Bei der Auswertung der Versuchsdaten konnte, innerhalb der Gruppen, kein signifikanter Einfluß dieses Verhältnisses festgestellt werden.

#### **5.4 Zusammenhang Belüftungskoeffizient - Gasgeschwindigkeit**

Der Belüftungskoeffizient ist proportional der Gasgeschwindigkeit. Diese Beobachtung findet sich häufig in der Literatur. Die von DECKWER et al. (1974) vorgeschlagene Form lautet:

$$k_L a = a * v_g^n \quad \text{Gleichung 5-17}$$

Im Kapitel 6 werden aus den Meßwerten für verschiedene Gaszerteilertypen die Koeffizienten  $a$  und  $n$  ermittelt. Dieser Zusammenhang enthält keine Information über die Belüfteranzahl oder Belegungsdichte.

#### **5.5 Sorptionskennzahl für Druckbelüftungssysteme**

In der Verfahrenstechnik ist es üblich dynamische Vorgänge dimensionslos zu beschreiben. Für den Stoffaustauschvorgang wurde von ZLOKARNIK (1978,1980b) auf Basis einer Ähnlichkeitstheoretische Betrachtung eine Sorptionskennzahl formuliert. Diese ist je nach Belüftungssystem etwas anders definiert. Sie stellt ein Qualitätsmerkmal eines Belüftungssystems dar. Je größer die Sorptionskennzahl ist desto effektiver kann Sauerstoff transportiert werden.

Die Sorptionskennzahl  $Y$  für Gaszerteiler errechnet sich zu:

$$Y = \frac{k_L a}{v_g} * \left(\frac{v^2}{g}\right)^{1/3} = \frac{OC_{10}}{H * \Delta c_{\log} * q_L} * \left(\frac{v^2}{g}\right)^{1/3} \quad \text{Gleichung 5-18}$$

Darin sind der Belüftungskoeffizient  $k_L a$  und die mittlere Konzentrationsdifferenz  $\Delta c_{\log}$  enthalten. Um die Vergleichbarkeit mit Daten aus der Literatur gewährleisten zu können, werden die im Kapitel 5 beschriebenen Umrechnungen vorgenommen. Insbesondere wird für die, den Vorgang beschreibende, Konzentrationsdifferenz die mittlere logarithmische Differenz  $\Delta c_{\log}$  verwendet. Für die Berechnung der Sorptionskennzahl wird die Luftmenge  $q_L$  auf den mittleren Systemdruck bezogen und die Sauerstoffzufuhr bei Standardbedingungen (entsprechend Gleichung 3-2) verwendet.

Die Sorptionskennzahl sollte bei konstanten Stoffdaten unabhängig von der Gasbelastung des Gaszerteilers sein, und eine apparatespezifische Konstante darstellen in der die Beckengeometrie sowie die Art und Anordnung der Gaszerteiler zum Ausdruck kommt (ZLOKARNIK 1980b). Auf einigen Anlagen konnte dies in gewissen Bereichen bestätigt werden. Auch Untersuchungen von HUIBREGTSE et al. (1983) und PÖPEL, WAGNER (1991) ergaben bei einer Verdoppelung der Anzahl der Belüfter (das bedeutet eine Halbierung der Gasbelastung) und ab einer vom Belüftertyp abhängigen Mindestbelegung nur eine Steigerung von ca. 15 % in der Sauerstoffausnutzung.

Häufig ist eine fallende Tendenz der Sorptionskennzahl bei steigender Gasbelastung feststellbar. Darüber hat auch ZLOKARNIK (1980b; 1980c) berichtet. Bei jeder Luftmenge stellt sich ein anderes Strömungsprofil ein. Die Abnahme wird mit der Formgebung und Anordnung der Gaszerteiler, der Umströmung der Gaszerteiler (Einschnürung im aufsteigenden Blasenschwärm, Koaleszenzverhalten des Stoffsystemes) und der dadurch bedingten Strömungsausbildung im Becken sowie mit der Umströmung der einzelnen Gaszerteiler in Zusammenhang gebracht (vergleiche Kapitel 5.3.1).

Daraus kann geschlossen werden, daß für viele in der Abwassertechnik eingesetzten Belüftungssysteme unter den auf Kläranlagen herrschenden Randbedingungen keine direkte Proportionalität zwischen  $k_L a$  und der Gasgeschwindigkeit besteht. Dies wird durch den Exponenten von  $v_g$  in der Gleichung 5-17 deutlich.

Eine mögliche Erklärung kann wie folgt gegeben werden: Voraussetzung für die direkte Proportionalität ist, daß der Gaszerteiler in seiner Funktion unabhängig von der durchgesetzten Gasmenge ein gleiches Luftblasenspektrum erzeugt. Diese Überlegung ist, wenn man Membranbelüfter betrachtet nur bedingt anwendbar: Membranbelüfter haben Löcher oder Schlitze, die sich je nach Luftbeaufschlagung mehr oder weniger aufdehnen, dadurch ist eine Änderung im Blasengrößenspektrum gegeben (vergleiche Kapitel 5.3). Wenn man die vorhandenen Daten nach diesen Kriterien sichtet, so stellt man fest, daß starr poröse Belüfter eher dem Ansatz  $Y = \text{konstant}$ , unabhängig von der Gasbelastung des Gaszerteilers entsprechen, als sogenannte Membranbelüfter, die eine ausgeprägte Abhängigkeit aufweisen. Dadurch ergeben sich Probleme beim scale up.

## 5.6 Gasdispergierkennzahl

Wenn zur Gaszerteilung mechanische Energie verwendet wird, ist die Sorptionskennzahl von dieser Energie abhängig. Dies ist zum Beispiel bei Düsenbelüftern, wo die kinetische Energie eines Flüssigkeitstreibstrahles zur Blasenzeugung verwendet wird, der Fall. Zur Beschreibung der Energie schlägt ZLOKARNIK (1980b) die Einführung einer Gasdispergierkennzahl X vor. Diese ist wie folgt definiert:

$$X = \frac{P}{Q_L} * \frac{1}{\rho_{O_2}(\nu g)^{2/3}} \quad \text{Gleichung 5-19}$$

Wichtig ist darauf hinzuweisen, daß die Luftmenge, die für die Berechnung der Sorptionskennzahl verwendet wird, auf den mittleren Systemdruck, und die Luftmenge, die zur Berechnung der Gasdispergierkennzahl verwendet wird, auf die Einblastiefe (die Austrittsstelle der Luft am Gaszerteiler) bezogen ist. Alle anderen Stoffdaten sowie temperatur- und druckabhängigen Werte müssen auf die gleichen Zustandsgrößen bezogen werden.

Für die Berechnung der Sorptionskennzahl und der Gasdispergierkennzahl wird die kinematische Viskosität der Flüssigphase benötigt. Die kinematische Viskosität von Wasser kann mit folgendem Polynom berechnet werden. Die Temperatur ist in °C einzusetzen.

$$\nu [10^{-6} \text{m}^2/\text{s}] = 1750 - 55,289 * T + 1,165 * T^2 - 0,01555 * T^3 + 9,53 * 10^{-5} * T^4$$

Nach HANEL (1982) kann man annehmen, daß die Viskosität im Belebtschlamm mit etwa 3 g/l Trockensubstanz um etwa 30 % größer als jene in destilliertem Wasser ist. Die Berechnungen für Belebtschlamm wurden daher mit der dynamischen Viskosität von Wasser mal dem Faktor 1,3 ausgeführt.

## 5.7 Bestimmung der Leistungsaufnahme der Luftverdichter

Für die Ermittlung des Sauerstoffertrages wird die Leistungsaufnahme der Verdichter benötigt. Um von den örtlichen Gegebenheiten auf den einzelnen Kläranlagen unabhängig zu sein und trotzdem praxisrelevante Sauerstofferträge angeben zu können, wurde folgender Ansatz verwendet (PÖPEL, WAGNER 1994):

$$P_R [W/\text{m}^3_{\text{BB}}] = a * (ET + H_r)^n * q_{\text{LN}} \quad \text{Gleichung 5-20}$$

Die Leistung ist auf das Beckenvolumen bezogen, ET und  $H_r$  ist in [m] und  $q_{\text{LN}}$  in  $[\text{m}^3_{\text{N}}/\text{m}^3_{\text{BB}}/\text{h}]$  einzusetzen.

Die Koeffizienten a und n sind je nach Verdichtertyp in der folgenden Tabelle angegeben.

	a	n
Drehkolbengebläse	4,3	1,0
Turboverdichter	4,5	0,83

Der Ansatz entspricht dem Erfahrungswert für den Energieaufwand von ca. 4-5 Wh/m<sub>N</sub><sup>3</sup>/m<sub>ET</sub>. Die Luftmenge ist auf die standardisierten Ansaugbedingungen (p=1 bar; T=20°C; trockene Luft) umzurechnen.

Für die Berechnungen wurde H<sub>r</sub> in zwei Komponenten geteilt. Eine Komponente wird von den Verlusten der Ansaugfilter, Schalldämpfer, Rohrleitungen, Armaturen, usw. bestimmt. Diese wurde konstant mit 0,4 mWS angenommen. Die zweite Komponente ist der Austrittsdruckverlust der Gaszerteiler. Diese wurde nach Herstellerangaben aus der Gasbelastung berechnet. Die allgemeine Form für den Austrittsdruckverlust der Gaszerteiler lautet:

$$\Delta p \text{ [mWS]} = 0,01 * (a + b * v_b[\text{m/h}]) \quad \text{Gleichung 5-21}$$

Die Koeffizienten sind diversen Firmenschriften entnommen

	a	b
Platten	45	1
Teller (flexibel)	10	0,8
Rohre (flexibel)	34	1
Rohre starr porös	14	0,4

Die Berechnung der Leistungsaufnahme der Verdichter mit der Wassertiefe anstelle der Einblastiefe und konstantem H<sub>r</sub> = 1 mWS ergibt nur geringe Unterschiede zur genauen Berechnung.

## 6. AUSWERTUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE

Unter Einsatz der in Kapitel 5 erläuterten Methoden sollen aus den vorliegenden Meßdaten Aussagen über Gaszerteilereinflüsse abgeleitet und Hinweise zur Auslegung und den Betrieb von Belüftungssystemen formuliert werden.

Die Basis der Auswertungen stellen Sauerstoffzufuhrmessungen auf großtechnisch realisierten Kläranlagen dar. Die Messungen wurden zum Großteil in Reinwasser ausgeführt.

Bei allen Messungen wurde

- die Sauerstoffzufuhrleistung des Belüftungssystems bezogen auf Standardbedingungen (vergleiche Kapitel 3.3) ermittelt, sie wird mit  $OC_{10}$  [ $kgO_2/m^3/h$ ] bezeichnet.
- die Geometrie des Belebungsbeckens
- die Art, Abmessungen und Menge der eingesetzten Gaszerteiler sowie die Art der Verteilung im Becken
- die Luftmenge
- die Leistungsaufnahme der Verdichter, Rührwerke und Pumpen

ermittelt (siehe Anhang). Der größte Teil der Messungen wurde selbst durchgeführt.

Aus diesen Meßergebnissen wurden entsprechend den Ausführungen in Kapitel 5

- der „wahre Belüftungskoeffizient“
- die „mittlere logarithmische Konzentrationsdifferenz“ und
- die Gasgeschwindigkeit und die Gasbelastung berechnet.

Bei den Auswertungen wird zwischen Messungen in Reinwasser und „unter Betriebsbedingungen“ unterschieden. Weiters wird zwischen Gaszerteilern und Düsenbelüfter, bei denen die Blasen durch die kinetische Energie eines Treibstrahles erzeugt werden, unterschieden. Eine Gliederung nach der Beckengeometrie Mischbecken und Umlaufbecken ist nicht bei allen Systemen gelungen.

Bei Umlaufbecken wird manchmal beobachtet, daß mit steigender Umwälzleistung bei gleicher Luftmenge die Belüftungskoeffizienten überproportional ansteigen. Zu diesem Thema wurden Untersuchungen in Schweden und Finnland

angestellt (RISSLER, HAHN 1995). Darin wird die Hypothese aufgestellt, daß zufolge der überlagerten horizontalen Strömung die Aufenthaltszeit der aufsteigenden Blasen, durch eine echte Reduktion der Aufstiegs geschwindigkeit, verlängert wird. Dort werden auch Untersuchungen in Frankreich (CEMAGREF) zitiert die, ein ähnliches Bild ergeben. Hier wurden bei überlagerten horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten von etwa 0,2 bis 0,3 m/s eine Erhöhung des Sauerstoffeintrages von 20 bis 30 % festgestellt. Untersuchungen von Van der GRAAF (1979) geben einen noch stärkeren Einfluß der überlagerten horizontalen Strömung an. Hier wurde, im Vergleich zum Betrieb ohne Umwälzung, eine Steigerung von etwa 50% festgestellt. Diesem Sachverhalt wurde bei den folgenden Auswertungen besondere Beachtung gewidmet.

### **6.1 Gaszerteiler Reinwasser.**

Betrachtet werden feinblasige, flächig angeordnete Druckbelüftungssysteme in vollständig durchmischten Becken. Für Mischbecken stehen sehr viel mehr Daten zur Verfügung als für Umlaufbecken. Die wenigen Daten von Umlaufbecken wurden mit in die Darstellungen aufgenommen. Die berechneten Korrelationen stützen sich aber nur auf die Daten von Mischbecken.

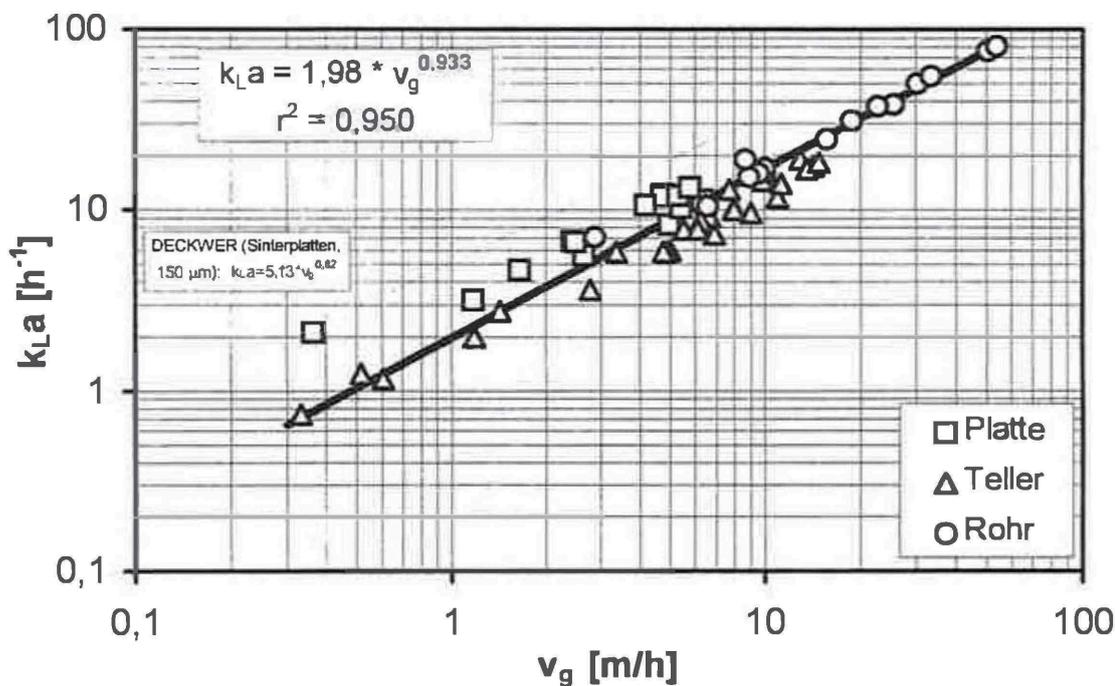
Die angegebenen Resultate beziehen sich auf Messungen in Reinwasser. Bei der Versuchsdurchführung wurde entsprechend der ÖNORM 5888 bzw. nach ATV (1995) vorgegangen.

Ein direkter Vergleich mit veröffentlichten Werten ist in Einzelfällen gelungen. So konnten Messungen mit Leerrohrgeschwindigkeiten von bis zu 50 m/h durchgeführt werden. Die ermittelten Belüftungskoeffizienten deckten sich mit den Resultaten aus DECKWER et al (1974). In den Abbildungen sind zu Vergleichszwecken auch Korrelationen aus der Literatur eingetragen. Beim Vergleich mit Literaturwerten tritt häufig das Problem auf, daß die Gaszerteiler nicht ausreichend beschrieben werden.

Da viele verschiedene Gaszerteiler auf Kläranlagen im Einsatz stehen, wurde eine Einteilung nach Platten-, Teller- und Rohrbelüftern vorgenommen. Die Streuung innerhalb der Gruppen ist erstaunlich gering, zumal innerhalb der Gruppen manchmal starr poröse und mit flexiblen Membranen ausgestattete Gaszerteiler zusammengefaßt sind. Darauf wird bei den einzelnen Gruppen noch näher eingegangen.

Um einen Überblick zu bekommen wurden zunächst alle drei Gaszerteilertypen gemeinsam dargestellt. Der Großteil der eingetragenen Datenpunkte ist ein Mittelwert aus mindestens zwei Einzelmessungen.

Zunächst wurde eine Korrelation Belüftungskoeffizient zu Gasgeschwindigkeit (siehe Kapitel 5.4) ermittelt.



**Abbildung 6-1: Belüftungskoeffizient  $k_{L,a}$  in Abhängigkeit der Gasgeschwindigkeit  $v_g$  für Druckbelüftungssysteme in REINWASSER**

In Abbildung 6-1 sind alle Meßwerte die mit feinblasigen Gaszerteilern ermittelt wurden eingetragen. Einige Daten wurden aus Publikationen aber auch mit freundlicher Erlaubnis der Verfasser aus unveröffentlichten Untersuchungsberichten hinzugefügt. Dies ermöglichte die statistische Absicherung der ermittelten Zusammenhänge. Zur Beurteilung der Aussagekraft wurden einfache statistische Tests verwendet. Das Bestimmtheitsmaß ist bei jeder Korrelation mit angegeben, die Wertzahl ist aus den Diagrammen abzählbar

Im doppelt logarithmischen Maßstab ordnen sich die Wertepaare  $k_{L,a}$  („wahrer Belüftungskoeffizient“) zur Gasgeschwindigkeit längs einer Geraden an. In der Abbildung 6-1 ist auch eine von DECKWER (1985) angegebene Korrelation eingetragen. Sie liegt deutlich höher als die eigenen Meßwerte. Dazu ist anzumerken, daß sie in einer Blasensäule  $\varnothing$  10 bzw. 15 cm und einer Wassertiefe von 2,5 und 4,4 m ermittelt wurde. In dieser Art der Darstellung fehlt die Information über die Gaszerteiler (z.B. Belegungsdichte).

Bei Umlaufbecken ist häufig nicht die ganze Becken Grundfläche mit Belüftern ausgestattet. Damit werden eigentlich zu geringe Gasgeschwindigkeiten errechnet. Zieht man nur jene Teile der Becken Grundfläche, die auch tatsächlich mit Belüftern belegt sind, für die Berechnung der Gasgeschwindigkeit heran, ergibt sich das Problem wie der Belüftungskoeffizient umzurechnen ist (der Sauerstoffgehalt steigt ja im ganzen Becken). Für dieses Problem kann keine allgemein gültige Lösung angegeben werden. In den Auswertungen wurde daher die ganze Becken Grundfläche für die Berechnung der Gasgeschwindigkeit eingesetzt. Die Werte für Umlaufbecken wurden nicht in die Korrelationen einbezogen.

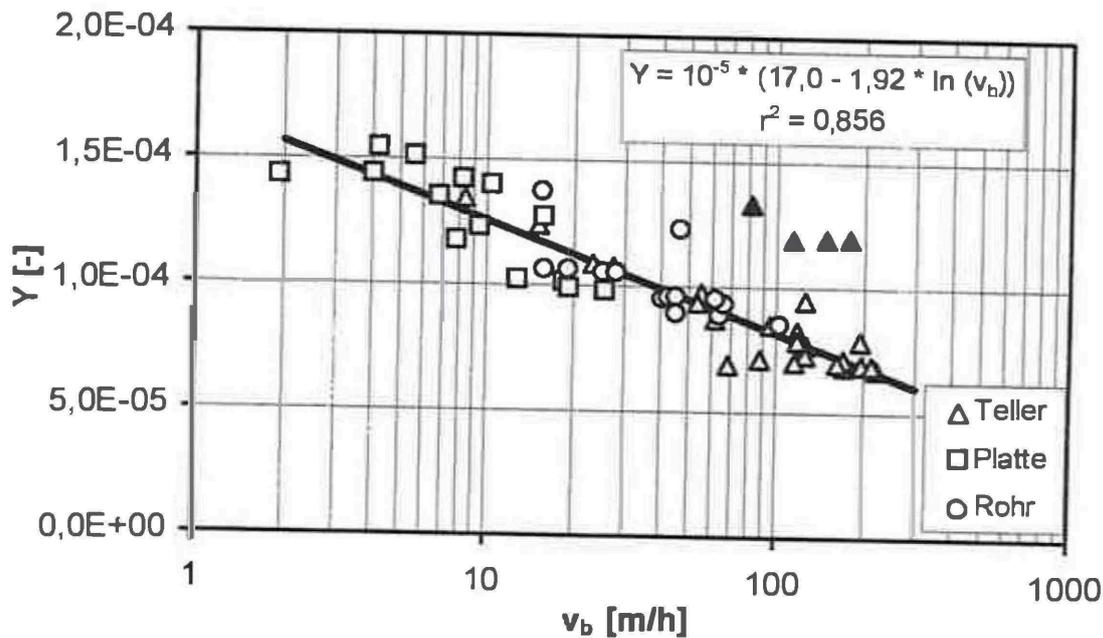
Aus der Abbildung 6-1 ist

- der vorwiegende Einsatzbereich (Luftgeschwindigkeit) herauszulesen. Er beträgt zwischen 3 und 10 m/h. In diesem Bereich ist mit einem  $k_{La}$  von 4 bis 20  $h^{-1}$  zu rechnen.
- der Bereich von günstigen zu ungünstigen Anordnungen ableitbar. Bei einer Gasgeschwindigkeit von 5 m/h treten  $k_{La}$ -Werte von 7 - 12  $h^{-1}$  auf. Das heißt bei ungünstiger Geometrie und Beaufschlagung sind Minusabweichungen von 40 % möglich.

Die Sorptionskennzahl  $Y$  über der Gasbelastung ist in der Abbildung 6-2 dargestellt. Diese Darstellung findet man auch in der Literatur (z.B. ZLOKARNIK 1980b, 1980c). Leider werden die Gasdurchsätze aber auf die „Einheit“ (gemeint ist Stück oder Meter) bezogen. Durch die sehr unterschiedlichen (und leider unbekannt) Abmessungen der Gaszerteiler ist ein Vergleich nicht möglich. Durch die in dieser Arbeit gewählte Bezugsgröße „Gasbelastung“ werden diese Vergleichsprobleme eliminiert.

Die Darstellung für alle feinblasigen Gaszerteiler zeigt, daß die Sorptionskennzahl zwischen  $6 \cdot 10^{-5}$  und  $1,5 \cdot 10^{-4}$  schwankt, wobei die größte Streuung bei den Tellerbelüftern auftritt. Hier ist die Anordnung von großem Einfluß. Die vier schwarz angelegten Dreiecke in der rechten oberen Ecke der Abbildung stammen aus Messungen in einem großen Umlaufbecken.

Trotz der sehr unterschiedlichen Gaszerteilertypen, Beckengeometrien und Belegungsichten (3 - 70 % der Becken Grundfläche) ordnen sich die Werte mit fallender Tendenz über der Gasbelastung an.



**Abbildung 6-2: Sorptionskennzahl Y in Abhängigkeit der Gasbelastung  $v_b$  für Druckbelüftung in REINWASSER**

Aus der Auftragung der Sorptionskennzahl über der Gasbelastung ermittelt man folgende Korrelation:

$$Y = 10^{-5} * (17,01 - 1,92 * \ln \frac{q_{LN} * H}{BD}) \quad r^2=0,856 \quad \text{Gleichung 6-1}$$

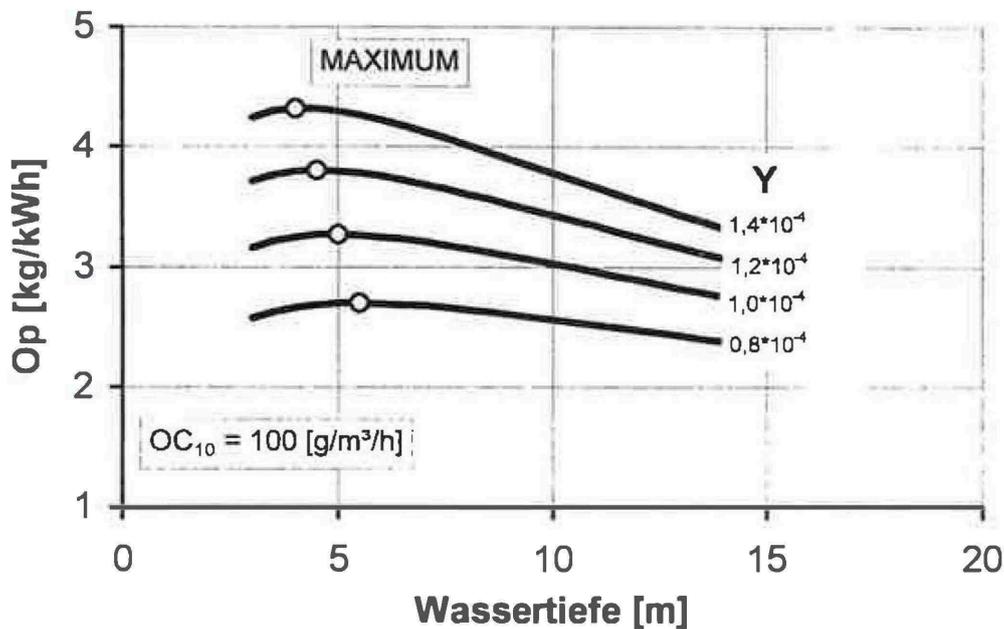
Durch Umformung der Definitionsgleichung (Gleichung 5-18) für Y erhält man eine Bestimmungsgleichung für die Luftmenge.

$$q_L = \frac{OC_{10}}{Y * \Delta c_{log} * H} * \left( \frac{v^2}{g} \right)^{1/3} \quad \text{Gleichung 6-2}$$

Die Konzentrationsdifferenz  $\Delta c_{log}$  in obiger Gleichung ist eine Funktion der Luftmenge  $q_L$ . Die Gleichung ist nicht mehr explizit nach  $q_L$  auflösbar, sie kann aber iterativ gelöst werden. Die so ermittelte Luftmenge ist per Definition auf den mittleren Systemdruck (in halber Wassertiefe) bezogen. Mit dieser Luftmenge kann mit Gleichung 5-20 die Leistungsaufnahme des Luftverdichters (im Beispiel wurde ein Drehkolbenverdichter angenommen) berechnet werden. Dazu ist der Luftvolumenstrom auf den Ansaugzustand des Verdichters umzurechnen. Mit der Leistung und der angenommenen Sauerstoffzufuhr kann man nun den Sauerstoffertrag bestimmen.

In Abbildung 6-3 ist das Ergebnis dargestellt. Dazu wurde in die Gleichung 6-2 ein Absolutwert für die Sorptionskennzahl eingesetzt, und eine Sauerstoffzufuhr

mit  $OC_{10}=100$  [g/m<sup>3</sup>/h] angenommen. Die Lösung erfolgte mittels Iteration in einem Tabellenkalkulationsprogramm.



**Abbildung 6-3: Sauerstofftrag  $Op$  in Abhängigkeit der Wassertiefe bei konstanter Sauerstoffzufuhr  $OC_{10}$  und unterschiedlichen Sorptionskennzahlen  $Y$**

Daraus erkennt man, daß

- eine optimale Wassertiefe existiert, die sich bei steigender Sorptionskennzahl zu geringeren Wassertiefen verschiebt
- ein System mit größerer Sorptionskennzahl bei einer Zunahme der Wassertiefe relativ mehr an  $Op$  verliert als ein System mit geringerer Sorptionskennzahl
- sich das Maximum des Ertrages mit abnehmenden Sorptionskennzahlen  $Y$  zu größeren Wassertiefen verlagert. Daraus ist abzuleiten, daß sehr effiziente Belüftungssysteme (mit großen Sorptionskennzahlen) bei größeren Wassertiefen keine Steigerung des Ertrages mehr zulassen

Wird auch  $Y$  als Funktion der Luftmenge (Gleichung 6-1) in Gleichung 6-2 eingesetzt, erhält man eine weitere Verknüpfung mit dem Luftdurchsatz.

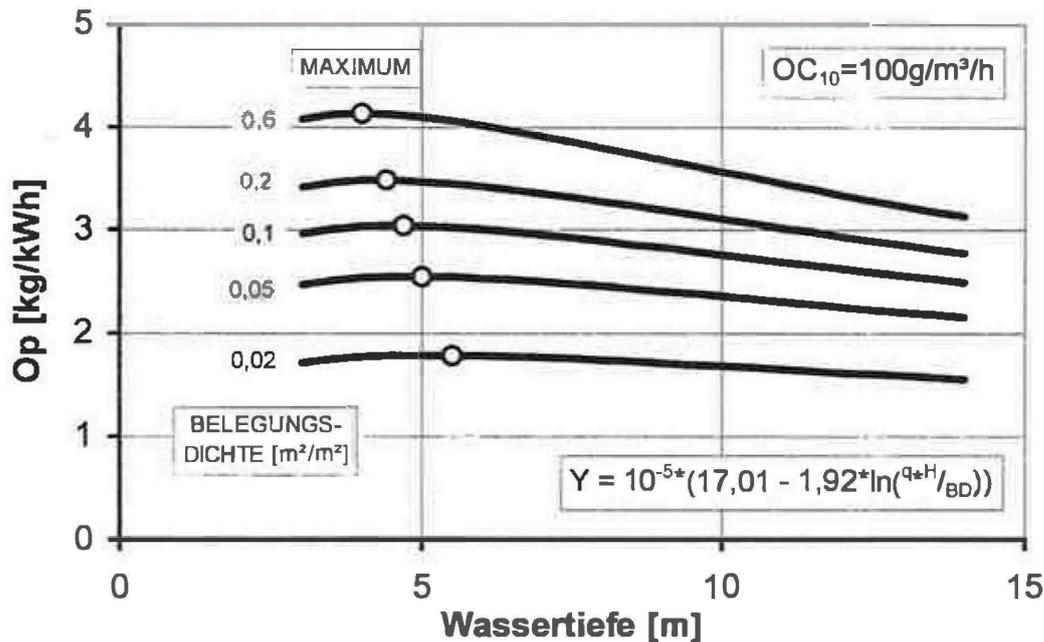
$$q_L = \frac{OC_{10}}{Y(q_{LN}) * \Delta c_{\log}(q_L) * H} * \left(\frac{v^2}{g}\right)^{1/3} \quad \text{Gleichung 6-3}$$

mit

$$Y = a - b * \ln \frac{q_{LN} * H}{BD} \quad \text{Gleichung 6-4}$$

Die Lösung ist auch in diesem Fall nur über eine Iteration zu erhalten. Die weitere Vorgangsweise ist wie bei  $Y=\text{konst.}$  Zusätzlich sind Belegungsdichten zur

Berechnung der Gasbelastung anzunehmen. Wählt man Belegungsdichten von 2% - 60% erhält man für den Sauerstofftrag folgende Abbildung:



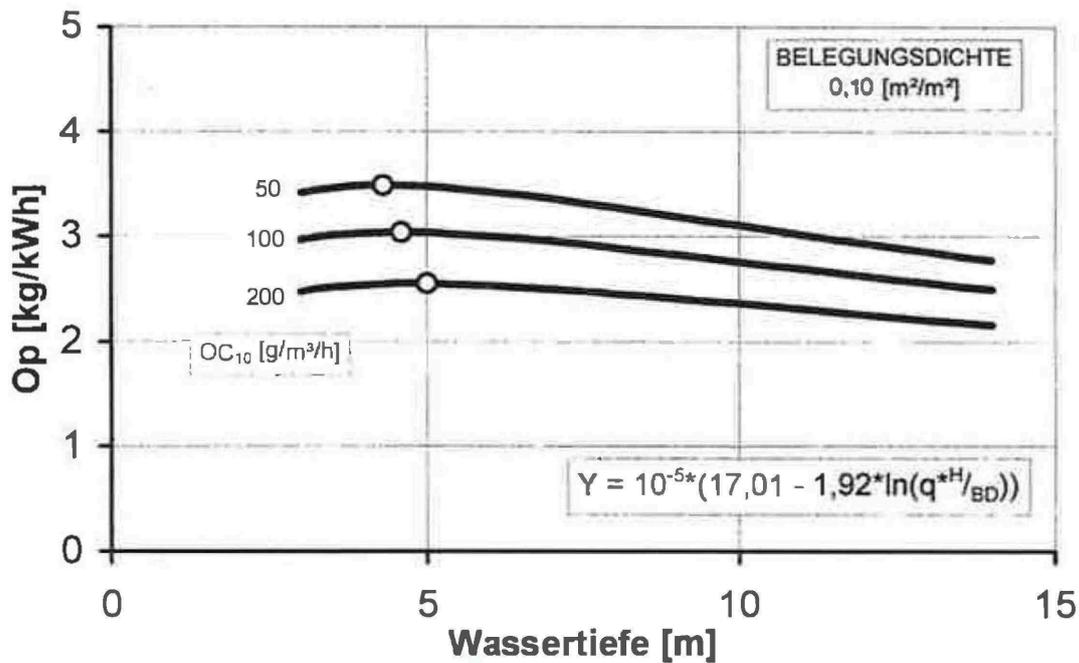
**Abbildung 6-4: Sauerstofftrag  $Op$  in Abhängigkeit der Wassertiefe bei konstanter Sauerstoffzufuhr  $OC_{10}$  und unterschiedlichen Belegungsdichten  $BD$**

Prinzipiell gelten die selben Aussagen wie unter  $Y = \text{konst.}$ . Zusätzlich erkennt man, daß

- mit sinkender Belegungsdichte oder steigender Sauerstoffzufuhr (und damit steigender Gasbelastung) die Veränderung des Sauerstofftrages bei steigender Wassertiefe geringer wird (die Kurven werden flacher).
- die optimale Wassertiefe von der Belegungsdichte und der Sauerstoffzufuhr abhängt
- aus einer Steigerung der Belegungsdichte von 5% auf 20% resultiert eine Steigerung des Sauerstofftrages um etwa 35%
- bei weiterer Steigerung der Belegungsdichte von 20% auf 60% nur mehr eine Steigerung des Sauerstofftrages um etwa 20% bewirkt wird.

Diese Aussagen decken sich mit Untersuchungsergebnissen von HUIBREGTSE et al. (1983) und PÖPEL, WAGNER (1991) die schon in Kapitel 5.5 angesprochen wurden.

Führt man die Rechnung mit gleichbleibender Belegungsdichte und veränderlicher Sauerstoffzufuhr  $OC_{10}$  aus, ergibt sich die Abbildung 6-5.



**Abbildung 6-5: Sauerstofftrag Op in Abhängigkeit der Wassertiefe für unterschiedliche Sauerstoffzufuhr OC<sub>10</sub> und konstante Belegungsdichte**

Die wesentlichste Erkenntnis aus den Auswertungen ist, daß mit steigender Wassertiefe der Sauerstofftrag sinkt.

Eine Erklärung dafür ist durch folgende Zusammenhänge möglich:

- Mit steigender Wassertiefe steigt die Sauerstoffausnutzung [g/g] und die spezifische Sauerstoffausnutzung [g/g/m] sinkt (siehe Kapitel 5.1 und 5.2)
- Bei konstanter Sauerstoffzufuhr [g/m³/h] wird dadurch die erforderliche Luftmenge bei einer Verdoppelung der Wassertiefe nicht halbiert sondern bleibt größer. Damit wird auch der Energieverbrauch nicht halbiert sondern bleibt ebenfalls größer. (Die Verminderung der Verluste durch die verringerte Strömungsgeschwindigkeit in den Gasleitungen, etc., wird vernachlässigt.)
- Bei einer Erhöhung der Wassertiefe sinkt aber auch die Beckengrundfläche, und bei konstanter Belegungsdichte damit auch die Gaszerteileroberfläche direkt proportional. Der Luftdurchsatz geht aber weniger stark zurück, das Resultat ist eine steigende Gasbelastung.
- Aber mit steigender Gasbelastung sinkt die Sorptionskennzahl und damit der Sauerstofftrag.
- Durch eine Erhöhung der Belegungsdichte kann die Gasbelastung wieder gesenkt werden und der Sauerstofftrag steigt wieder.

### 6.1.1 Plattenbelüfter

In diesem Abschnitt werden die Meßergebnisse der Anlagen auf denen *Plattenbelüfter* im Einsatz sind betrachtet. Die angegebenen Resultate beziehen sich auf Messungen in *Reinwasser*. Bei der Versuchsdurchführung wurde entsprechend der ÖNORM 5888 bzw. nach ATV (1995) vorgegangen.

Im Gegensatz zum vorigen Abschnitt werden die Korrelationen, aber jetzt nur mit den Daten dieser Gaszerteilertypen bestimmt und daraus die Sauerstofftragwerte berechnet. Die Datenbasis umfaßt 7 Belebungsanlagen (14 Versuche) die mit Plattenbelüftern und einer abgasenden Fläche von 3-5m<sup>2</sup> ausgerüstet sind (Tabelle 6-1). Die Gaszerteiler sind vom selben Erzeuger und waren nach Herstellerangaben mit unterschiedlichen Folien ausgestattet. Diese Unterschiede konnten nicht berücksichtigt werden. Bei den Plattenbelüftern liegt die maximal mögliche Belegungsdichte bei ca. 80% der Beckengrundfläche.

**Tabelle 6-1: Anlagen Plattenbelüfter**

Anlage	Beckentyp	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Tiefe [m]	Belegung [%]
Wmess	Misch	300	3,3	68
Purg	Misch	490	3,9	65
Sa14	Misch	900	3,1	50
Wrne	Misch	1270	4,0	44
Unke	Umlauf	2050	5,4	40
Stmi	Misch	550	4,5	39
Sa56	Misch	970	4,3	34

Die Kläranlage 'Unke' ist ein Umlaufbecken, alle anderen Anlagen sind als Mischbecken zu betrachten. Die Meßwerte der Umlaufbecken zeigen keine Abweichung von den anderen Anlagen. Die Belüftungskoeffizienten wurden mit Gasbelastung von 2 bis 25 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h ermittelt.

Aus Abbildung 6-6 erkennt man, daß übliche Gasgeschwindigkeiten bei etwa 5 m/h liegen. Der geringe Wert von < 0,5 m/h stellt einen Sonderfall dar der auch meßtechnisch Probleme bereitet. Die Abbildung 6-7 zeigt, daß bei Gasbelastungen von 5-20 m/h Sorptionskennzahlen von  $1 \cdot 10^{-4}$  bis  $1,5 \cdot 10^{-4}$  erreicht werden.

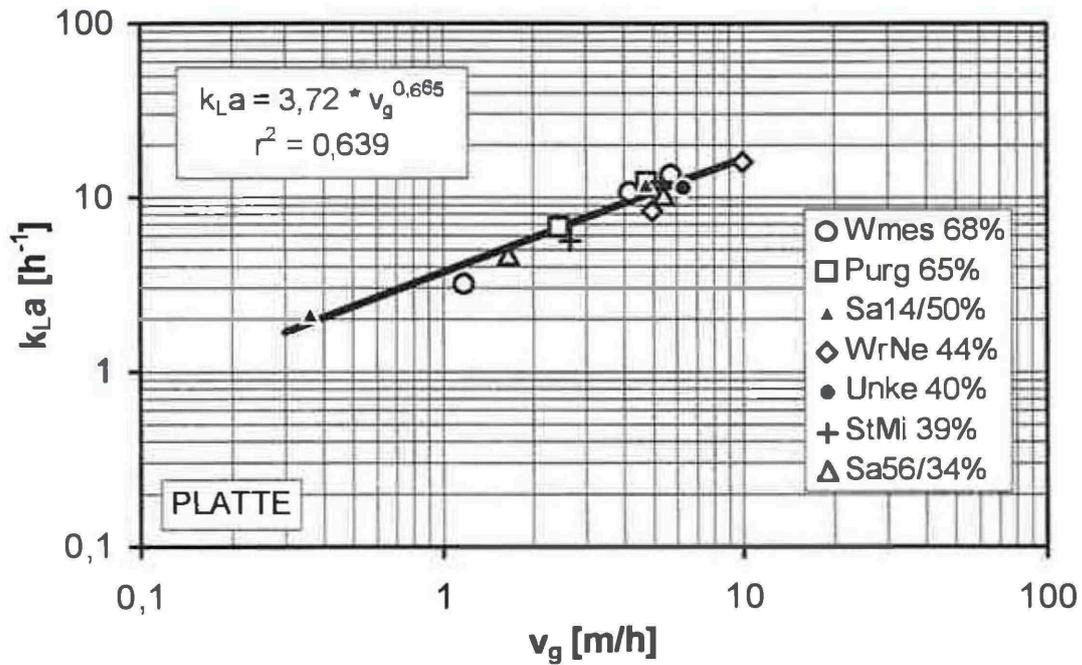


Abbildung 6-6: Belüftungskoeffizient  $k_{La}$  in Abhängigkeit der Gasgeschwindigkeit  $v_g$  für Plattenbelüfter in REINWASSER

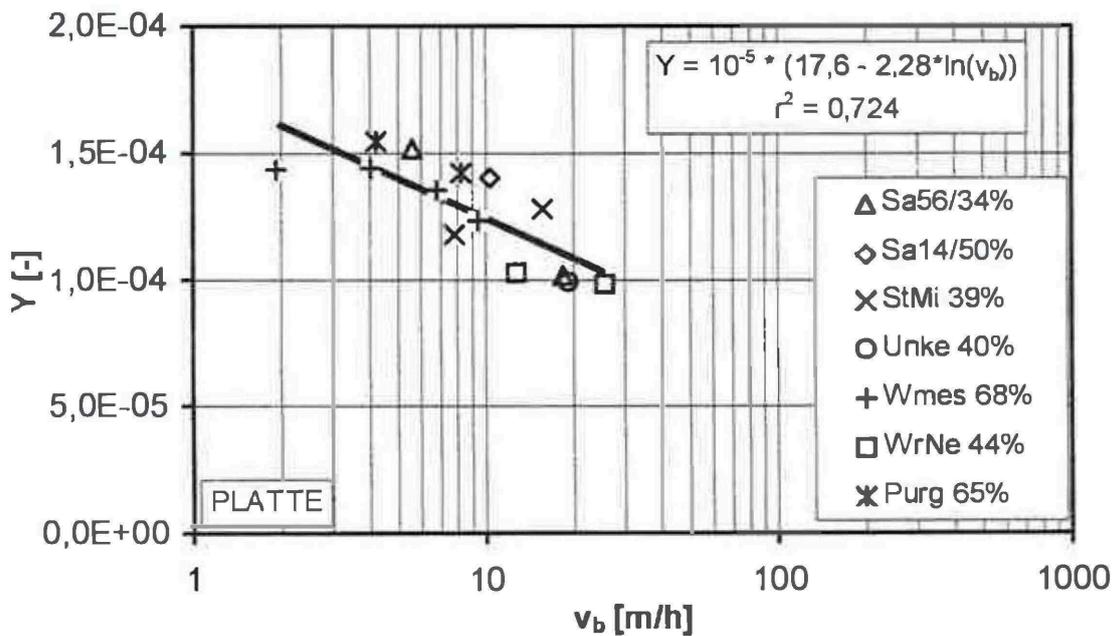
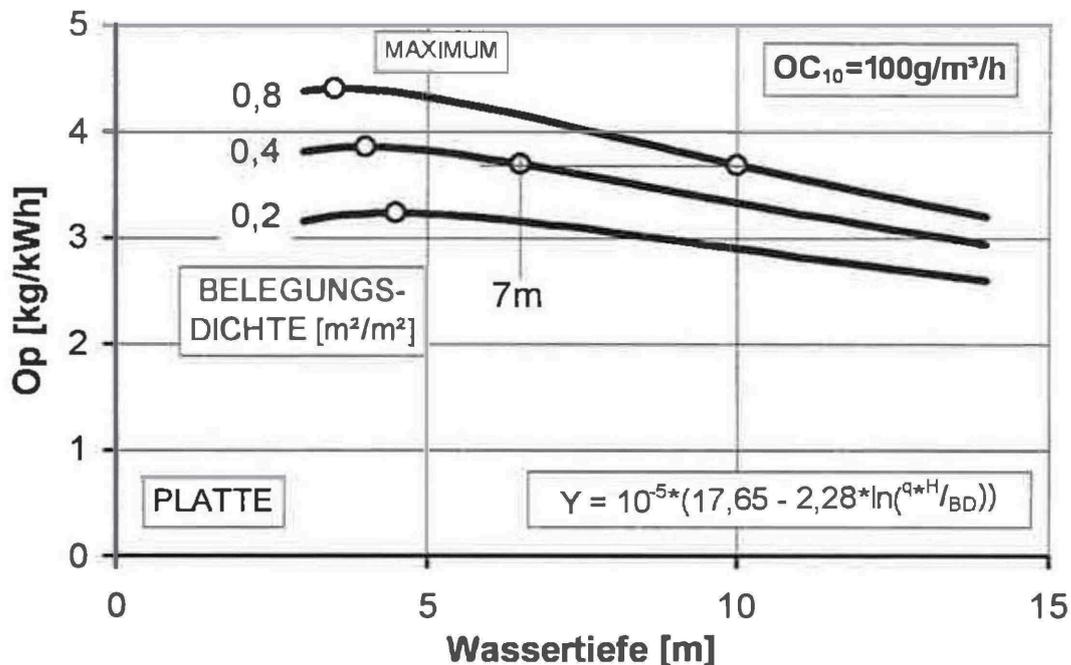


Abbildung 6-7: Sorptionskennzahl  $Y$  in Abhängigkeit der Gasbelastung  $v_b$  für Plattenbelüfter in REINWASSER

Es wird nun, wie schon unter Kapitel 6.1 verfahren. Unter Verwendung der Korrelation für die Plattenbelüfter

$$Y = 10^{-5} * (17,65 - 2,28 * \ln \frac{q_{LN} * H}{BD}) \quad r^2 = 0,724 \quad \text{Gleichung 6-5}$$

und Gleichung 6-3 wird mit entsprechenden Annahmen für die Wassertiefe, die Belegungsdichte und die Sauerstoffzufuhr der erforderliche Luftvolumenstrom berechnet. Mit diesem und der Gleichung 5-20 für die Leistungsaufnahme von Drekolbenverdichtern wird der Sauerstofftrag berechnet. Die Resultate der Berechnung sind in Abbildung 6-8 bis 12 dargestellt.



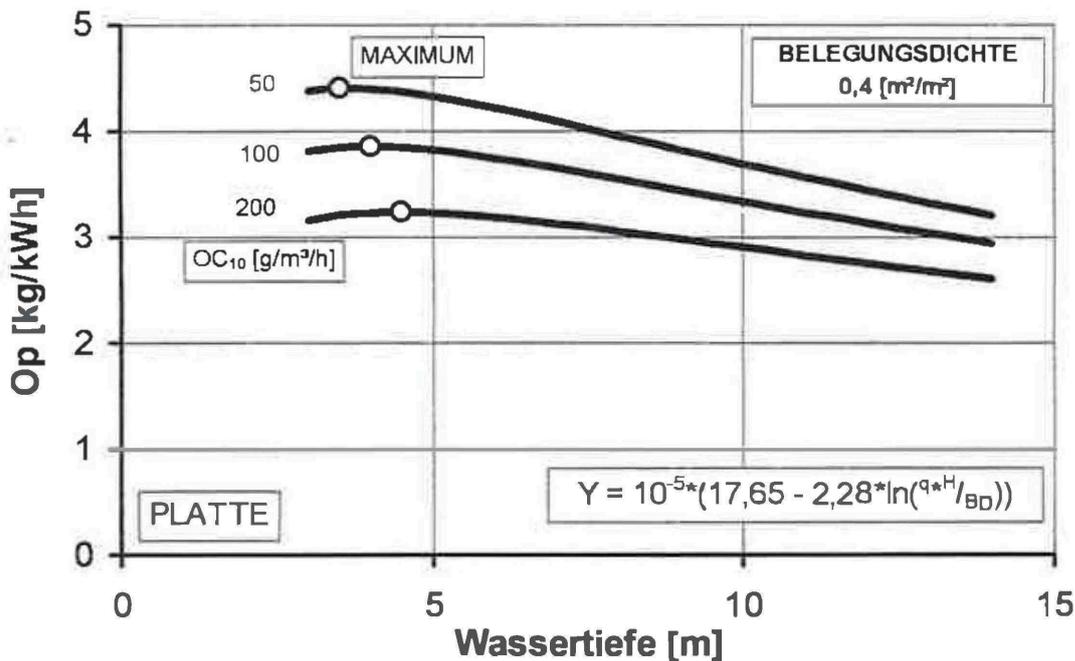
**Abbildung 6-8: Sauerstofftrag  $Op$  in Abhängigkeit der Wassertiefe für unterschiedliche Belegungsdichte und einer Sauerstoffzufuhr von  $100 \text{ g/m}^3/\text{h}$  für Plattenbelüfter**

Die Zusammenhänge, die unabhängig vom Gaszerteilertyp, im vorigen Abschnitt abgeleitet wurden, werden auch bei den Plattenbelüftern bestätigt. Die wesentlichste Aussage ist aber, daß der Sauerstofftrag mit steigender Wassertiefe sinkt.

Die Abbildung 6-8 und Abbildung 6-9 können bei entsprechende Wahl der Belegungsdichte und der Sauerstoffzufuhr in der Abbildung 6-10 zusammengefaßt werden. Aus der grafischen Auftragung der Resultate lassen sich folgende Zusammenhänge erkennen:

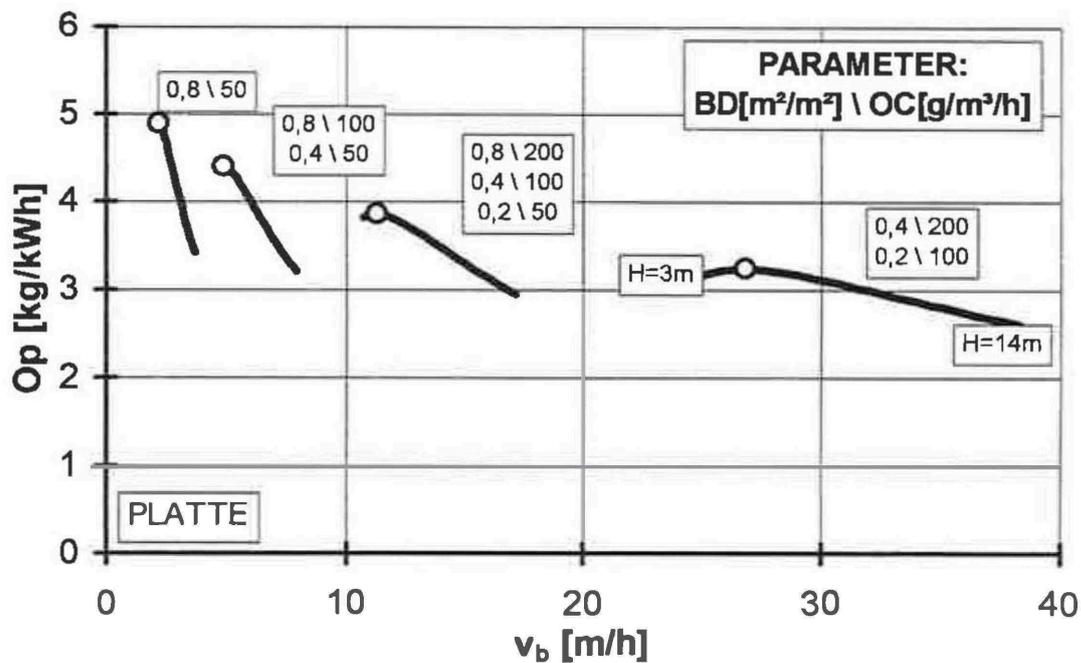
- Mit sinkender Belegungsdichte oder steigender Sauerstoffzufuhr (und damit steigender Gasbelastung) wird die Veränderung des Sauerstofftrages bei steigender Wassertiefe geringer (die Kurven werden flacher).
- Eine Steigerung der Belegungsdichte von  $BD=0,2$  auf  $0,4$  wirkt sich wesentlich stärker aus als von  $BD=0,4$  auf  $0,8$ .

- Die Wassertiefe und die Belegungsdichte sind unter der Forderung gleicher Sauerstoffzufuhr und konstantem Sauerstofftrag in gewissen Grenzen austauschbar. An einem Beispiel (Abbildung 6-8) ist zu erkennen, daß der Sauerstofftrag von 3,7 kg/kWh bei einer Belegungsdichte von 40% bei einer Wassertiefe von ca. 7m auftritt. Wird die Belegungsdichte auf 80% erhöht kann, bei gleichbleibendem Sauerstofftrag, die Beckentiefe 10m sein.
- Die Abbildung 6-10 zeigt deutlich, daß die Belegungsdichte BD und die Sauerstoffzufuhr OC austauschbar sind. Die Kurven für BD=0,4 und OC=100 g/m<sup>3</sup>/h und jene für BD=0,8 mit OC=200 g/m<sup>3</sup>/h sind identisch.
- Bei der maximalen Belegungsdichte von 80% ist ein Sauerstofftrag von 5 kg/kWh (in Reinwasser!) erreichbar. Dieser hohe Sauerstofftrag wird aber nur bei einer geringen Sauerstoffzufuhr von ca. 50 g/m<sup>3</sup>/h erreicht.



**Abbildung 6-9: Sauerstofftrag Op in Abhängigkeit der Wassertiefe für unterschiedliche Sauerstoffzufuhr bei einer Belegungsdichte von 0,4 für Plattenbelüfter**

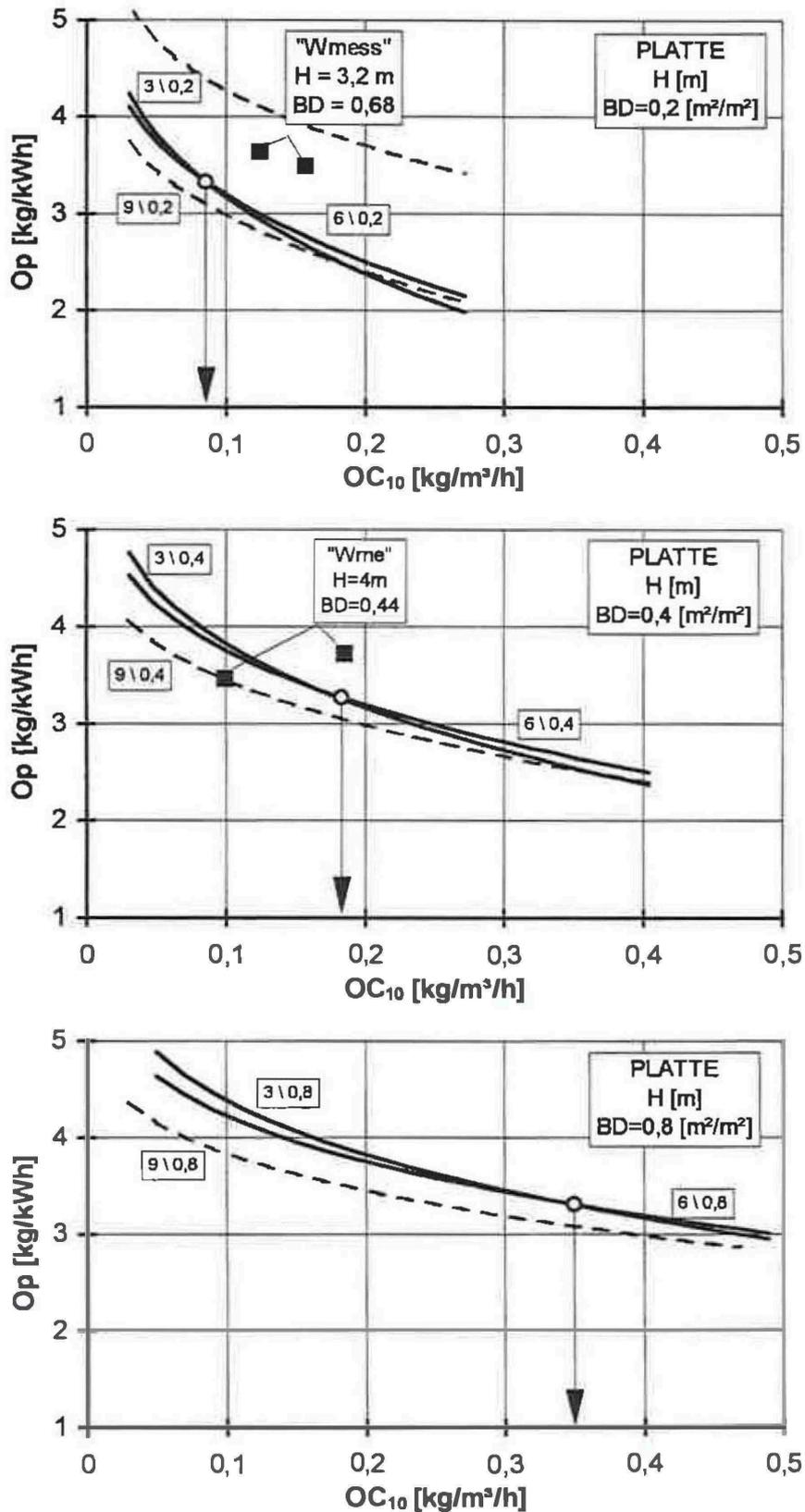
Der Energieverbrauch für die Belüftung hängt von den Änderungen des Sauerstofftrages in Abhängigkeit der Sauerstoffzufuhr ab (Sauerstoffzufuhr-Charakteristik des Belüftungssystems). Dazu ist festzuhalten, daß auf einer bestehenden Anlage die Wassertiefe eine Konstante darstellt. Die einzige Variable, zur Anpassung der Sauerstoffzufuhr an den jeweiligen Sauerstoffverbrauch ist die Luftmenge. Die Änderungen der Belegungsdichte aus Gründen der Nitrifikation und Denitrifikation ist nicht relevant, da sie nicht mit dem Ziel der Optimierung des Sauerstofftrages eingesetzt wird.



**Abbildung 6-10: Sauerstofftrag  $Op$  in Abhängigkeit der Gasbelastung  $v_b$  für unterschiedliche Belegungsdichte, Wassertiefe und Sauerstoffzufuhr für Plattenbelüfter**

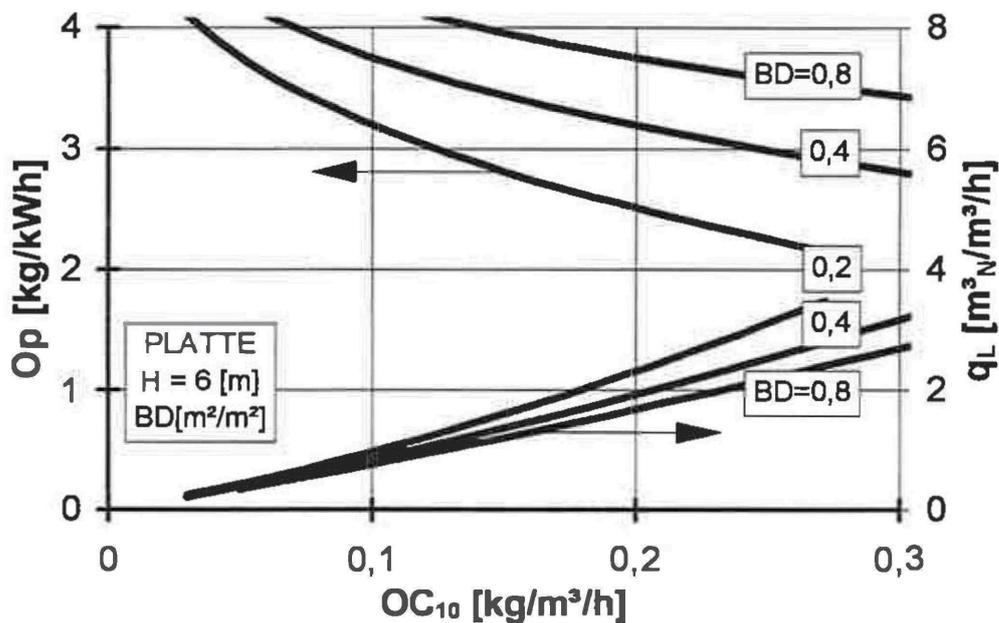
Zur Veranschaulichung sind in den Abbildung 6-11 und 12 die Sauerstoffzufuhr-Charakteristiken für Plattenbelüfter zusammengestellt. Als Parameter wurden Wassertiefen von 3-9 m und Belegungsdichten von 0,2 bis 0,8 gewählt. Aus den Abbildungen können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- Der Sauerstofftrag nimmt mit steigender Belegungsdichte zu.
- Die optimale Wassertiefe bewegt sich zwischen 3 und 5 m.
- Die Wassertiefe hat vergleichsweise geringen Einfluß.
- Bei geringer Sauerstoffzufuhr verzeichnet immer die Wassertiefe von 3m den größten Sauerstofftrag.
- Bei steigender Sauerstoffzufuhr fallen die Kurven umso stärker je tiefer das Becken wird. Dadurch gibt es Schnittpunkte mit den Linien der anderen Wassertiefen. Die Schnittpunkte bedeuten, daß ab dieser Sauerstoffzufuhr die jeweils größere Wassertiefe den höheren Sauerstofftrag liefert.
- Bei hohen Belegungsdichten erzielt man in flachen Becken einen günstigeren Sauerstofftrag als in tiefen Becken.
- Man erkennt auch deutlich, daß ein Becken mit 9 m Wassertiefe, bei praktisch relevanten Sauerstoffzufuhr Werten (bis 300g/m<sup>3</sup>/h), in keinem Fall einen günstigeren Sauerstofftrag ergibt als flachere Becken.



**Abbildung 6-11: Sauerstoffertrag  $Op$  in Abhängigkeit der Sauerstoffzufuhr  $OC$  für unterschiedliche Belegungsdichte und Wassertiefe für Plattenbelüfter**

In der Abbildung 6-11 sind die Meßwerte der Anlagen „Wrne“ und „Wmess“ eingetragen. Die Abweichungen von der berechneten Sauerstoffzufuhr-Charakteristik liegen in beiden Fällen in der Größenordnung von  $\pm 10\%$ .



**Abbildung 6-12: Sauerstofftrag  $Op$  und Luftmenge  $q_L$  in Abhängigkeit der Sauerstoffzufuhr  $OC$  für unterschiedliche Belegungs-dichte für Plattenbelüfter**

In der Abbildung 6-12 ist die Sauerstoffzufuhr-Charakteristik für Plattenbelüfter in Reinwasser dargestellt. Zusätzlich ist der Luftvolumenstrom eingetragen. Man erkennt, daß bei einer Erhöhung der Sauerstoffzufuhr eine überproportionale Erhöhung der Luftmenge erforderlich ist. So muß bei einer Erhöhung der Sauerstoffzufuhr von  $100 \text{ g/m}^3/\text{h}$  auf  $200 \text{ g/m}^3/\text{h}$  (bei einer Belegungs-dichte von 0,2) die Luftmenge um 140% gesteigert werden. Dadurch sinkt der Sauerstofftrag.

Bei konstanter Sauerstoffzufuhr ist mit steigender Belegungs-dichte, aufgrund der damit verbundenen höheren Sauerstoffausnutzung, eine geringere Luftmenge erforderlich. Je mehr sich die Luftmengen bei einer konstanten Sauerstoffzufuhr unterscheiden, desto größer ist die Veränderung der Ausnutzung bei geänderter Belegungs-dichte. So ist bei einer Sauerstoffzufuhr von  $200 \text{ g/m}^3/\text{h}$  bei einer Erhöhung der Belegungs-dichte von 0,2 auf 0,8 eine Reduktion der Luftmenge um ca. 25% feststellbar.

### 6.1.2 Tellerbelüfter

In diesem Abschnitt werden die Meßergebnisse der Anlagen auf denen Tellerbelüfter im Einsatz sind betrachtet. In dieser Gruppe sind sowohl starr poröse als auch „flexible“ - Typen zusammengefaßt. Die angegebenen Resultate beziehen sich auf Messungen in Reinwasser. Bei der Versuchsdurchführung wurde entsprechend der ÖNORM 5888 bzw. nach ATV (1995) vorgegangen.

Wie im vorigen Abschnitt werden die Korrelationen, aber jetzt nur mit den Daten dieser Gaszerteilertypen, bestimmt und daraus die Sauerstoffertragswerte berechnet. Die Datenbasis umfaßt 8 Belebungsanlagen (19 Versuche aber nur 15 in der Korrelation berücksichtigt, siehe Tabelle 6-2). Die Gaszerteiler sind von unterschiedlichen Herstellern (auch die Membran!) und haben  $\varnothing$  von 150-250mm. Bei den unterschiedlichen Anlagen mit Tellerbelüftern zeigt sich, daß die belegte Bodenfläche zwischen etwa 2,5 bis max. 12 % schwankt. Bei den Tellerbelüftern liegt die maximal theoretisch mögliche Belegungsdichte bei ca. 20%.

**Tabelle 6-2: Anlagen Tellerbelüfter**

Anlage	Beckentyp	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Tiefe [m]	Belüfterart	Belegung [%]
W312	Misch	1330	4,3	Teller starr porös	2,5
Blud*	Umlauf	3970	4,5	Membranteller	3,6
Immu	Misch	340	3,8	Membranteller	3,6
Göss	Misch	1320	8,6	Membranteller	6,9
W420	Misch	650	4,3	Teller starr porös	6,9
Verh*	Misch	64	4	Teller starr porös	7,8
L320	Misch	408	5	Teller starr porös	9,9
Judb	Misch	710	3,1	Membranteller	11,7

Die in obiger Tabelle mit \* bezeichneten Werte wurden in die Regressionsrechnung nicht einbezogen.

In den Abbildung 6-13 und Abbildung 6-14 sind Membranteller und starr poröse Belüferteller zusammengefaßt. In der Legende zu den einzelnen Anlagen sind Prozente angegeben. Diese Prozentwerte beziehen sich auf die Belegungsdichte. Aus diesen Werten ist ersichtlich, daß es bei vielen Systemen keinen Unterschied macht, ob 3 % der Beckengrundfläche oder 12 % der Beckengrundfläche belegt sind. Trotz der Unterschiede in der Luftbeaufschlagung und der Beckengeometrie (und der Belüfteranordnung - Strömungsbildung) ergibt sich ein doch recht einheitliches Bild.

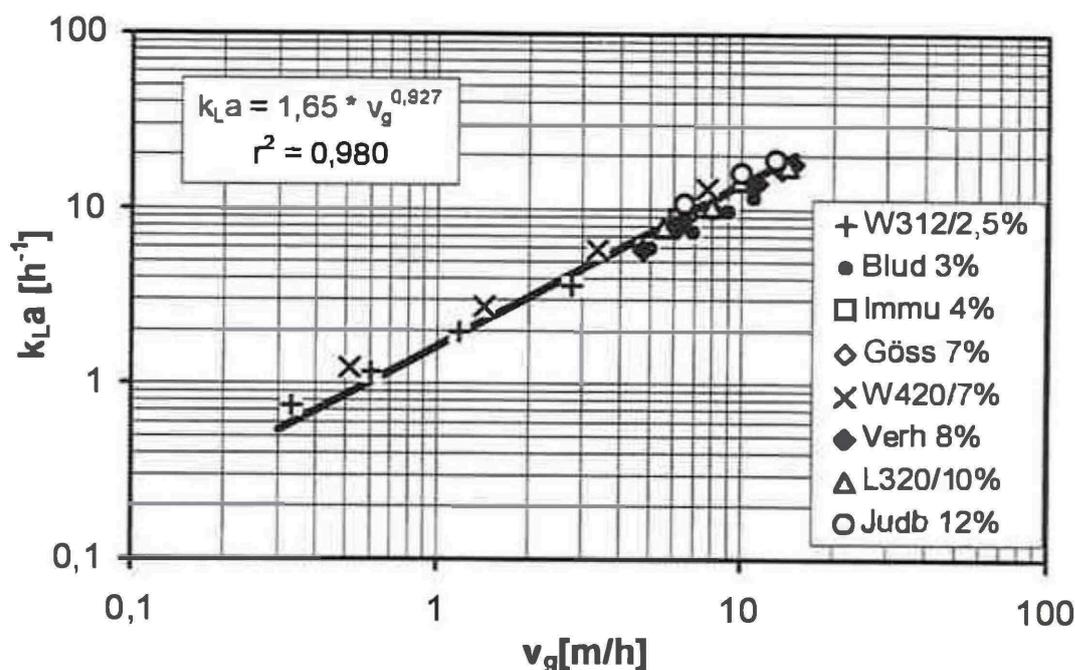


Abbildung 6-13: Belüftungskoeffizient  $k_{La}$  in Abhängigkeit der Gasgeschwindigkeit  $v_g$  für Tellerbelüfter in REINWASSER

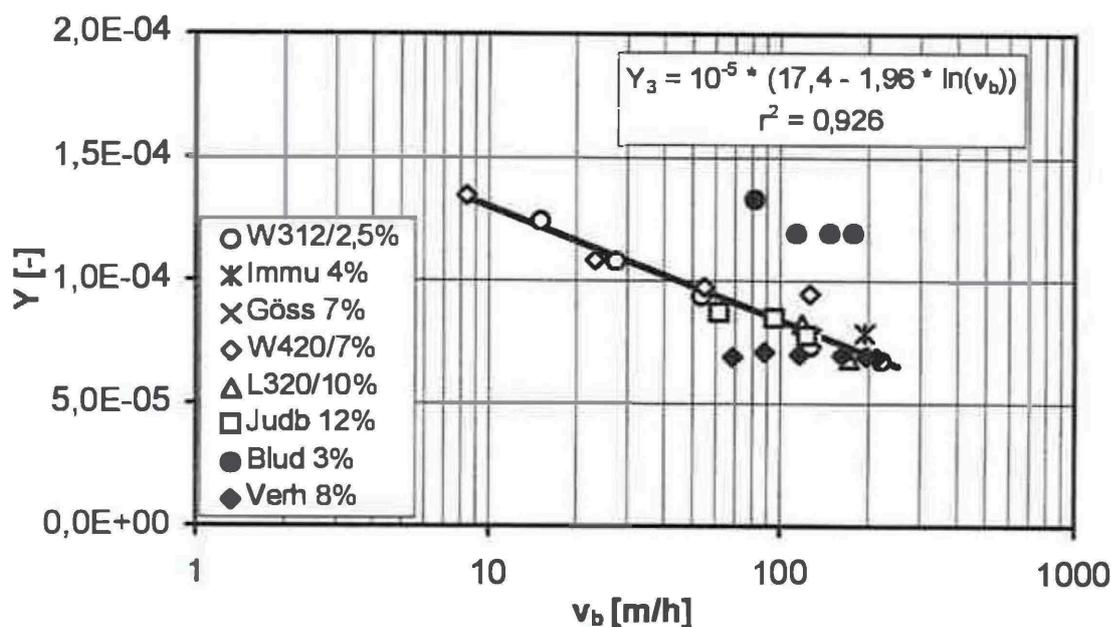


Abbildung 6-14: Sorptionskennzahl  $Y$  in Abhängigkeit der Gasbelastung  $v_b$  für Tellerbelüfter in REINWASSER

Die mit vollen Symbolen eingetragenen Datenpunkte wurden bei der Ermittlung der Korrelation nicht berücksichtigt. Die Sorptionskennzahl der Messungen auf der Anlage „Blud“ (Umlaufbecken mit Strömungsbildnern) haben Werte etwa 30 % über dem Durchschnitt der Mischbecken ergeben. Im Kapitels 6. wurde schon über

die Sonderstellung von Umlaufbecken berichtet. Die eigenen Untersuchungen zeigen auch den Trend, das die Werte deutlich größer als erwartet sind.

VERHAAGEN präsentierte 1978 Daten (sie sind in Abbildung 6-14 unter der Bezeichnung „Verh“ mit aufgenommen), die er in einem Becken von 4 mal 4 m Grundriß und 4 m Wassertiefe für verschiedene Aufteilungen von Belüftungsteller ermittelt hat. Bei einer Steigerung der Belegungsdichte um 40% erhielt er eine Steigerung der Sauerstoffzufuhr um 20% (bei gleicher Luftmenge!). Die Belegungsdichte bewegt sich von etwa 2 bis 10 % der Beckengrundfläche. Rechnet man seine Ergebnisse auf die gleiche Gasbelastung um, so erkennt man, daß die Belegungsdichte praktisch keinen Einfluß auf den Belüfungskoeffizienten hat. Die Belüfter waren starr porös, d.h. die Änderung in der Gasbelastung bedingt nur eine geringe Veränderung der Blasengrößenverteilung (siehe Kapitel 5.3). Die dort aufgestellte Hypothese, daß starr poröse Gaszerteiler eher den Vorstellungen (ZLOKARNIK 1980b)  $Y = \text{konst.}$  entsprechen wird dadurch untermauert.

Nun wird wieder wie unter Kapitel 6.1 verfahren. Unter Verwendung der Korrelation für die Tellerbelüfter

$$Y = 10^{-5} * (17,40 - 1,96 * \ln \frac{q_{LN} * H}{BD}) \quad r^2 = 0,926 \quad \text{Gleichung 6-6}$$

und Gleichung 6-3 wird mit entsprechenden Annahmen für die Wassertiefe, die Belegungsdichte und die Sauerstoffzufuhr der erforderliche Luftvolumenstrom berechnet. Mit diesem und der Gleichung 5-20 für die Leistungsaufnahme für Drehkolbenverdichter wird der Sauerstofftrag berechnet. Die Resultate der Berechnung sind in Abbildung 6-15 bis Abbildung 6-19 dargestellt. Man erkennt:

- Mit sinkender Belegungsdichte oder steigender Sauerstoffzufuhr (und damit steigender Gasbelastung) wird die Veränderung des Sauerstofftrages bei steigender Wassertiefe geringer (die Kurven werden flacher).
- Die Abhängigkeit von der Wassertiefe ist nicht so stark ausgeprägt wie bei den Plattenbelüftern
- Die optimale Wassertiefe bewegt sich zwischen 4 und 7 m. Sie ist damit tendenziell größer als bei den Plattenbelüftern.
- Eine Steigerung der Belegungsdichte von  $BD=0,03$  auf  $0,06$  wirkt sich auch bei den Tellerbelüftern wesentlich stärker aus als von  $BD=0,06$  auf  $0,12$
- Bei geringer Belegungsdichte oder hoher Sauerstoffzufuhr wird der Einfluß der Wassertiefe sehr gering.

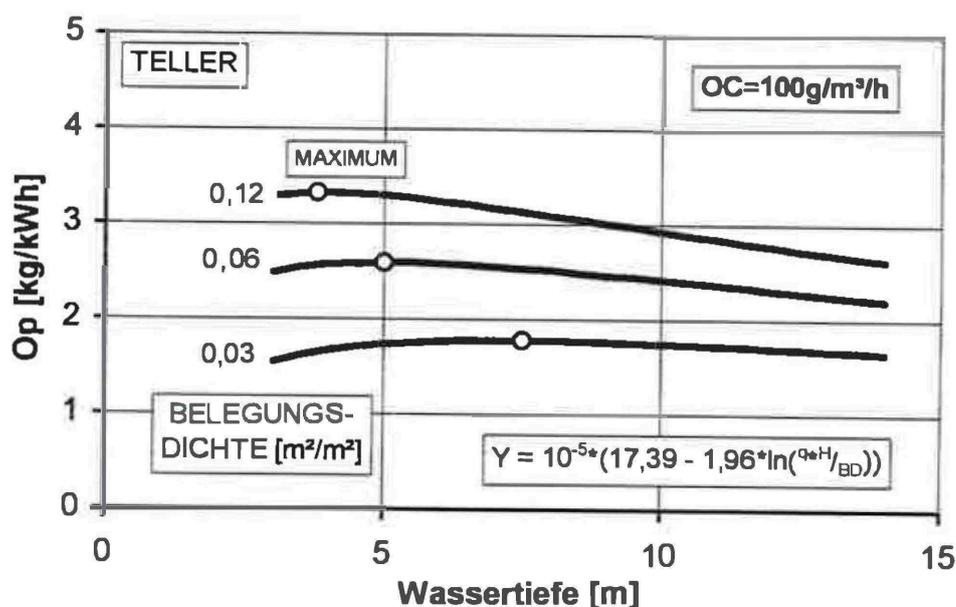


Abbildung 6-15: Sauerstoffertrag  $Op$  in Abhängigkeit der Wassertiefe für unterschiedliche Belegungs-dichte und einer Sauerstoffzufuhr von 100 g/m³/h für Tellerbelüfter

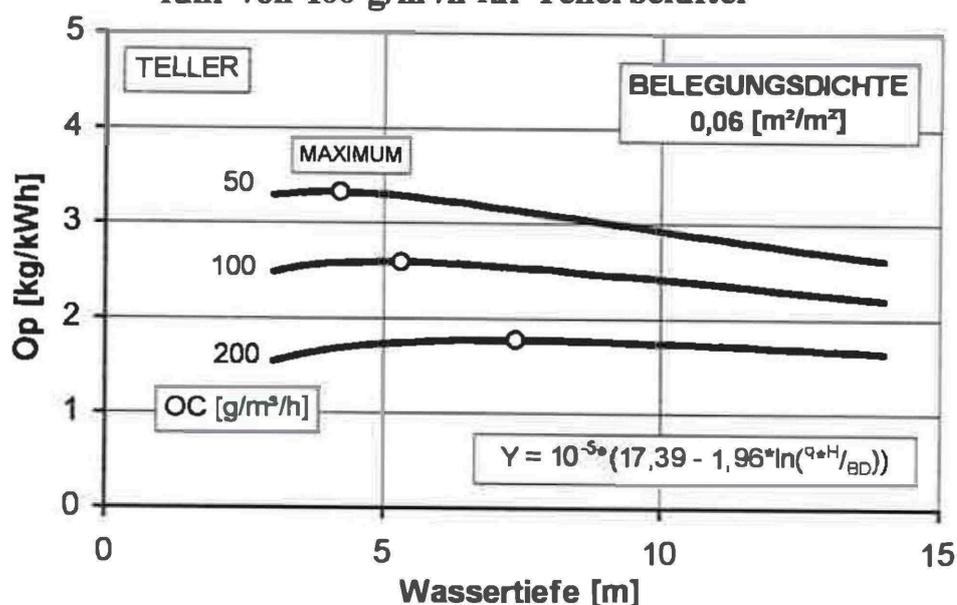
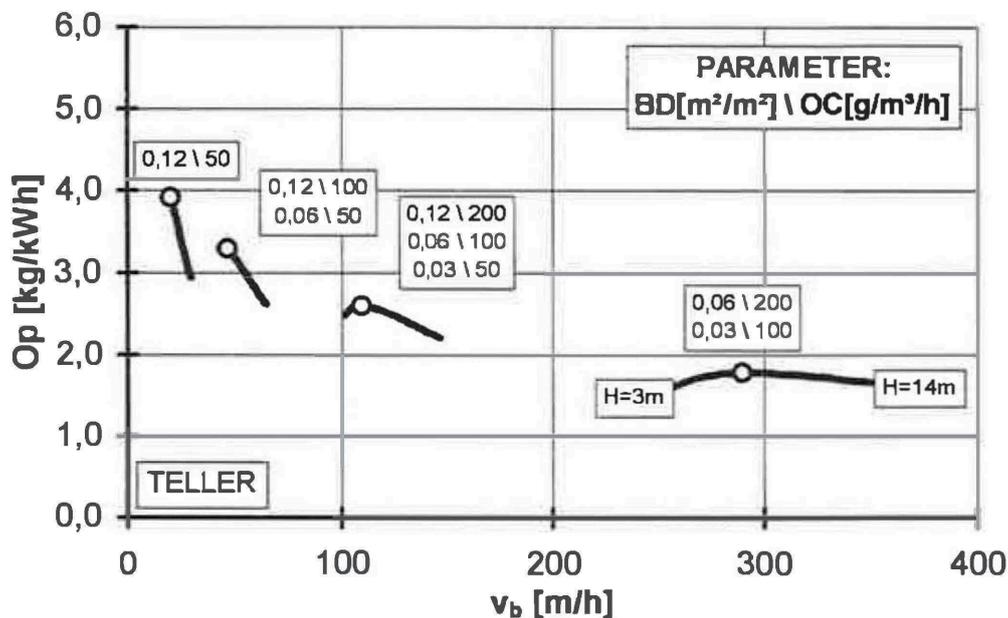


Abbildung 6-16: Sauerstoffertrag  $Op$  in Abhängigkeit der Wassertiefe für unterschiedliche Sauerstoffzufuhr bei einer Belegungs-dichte von 0,06 für Tellerbelüfter

Die Zusammenhänge, die unabhängig vom Gaszerteilertyp, abgeleitet wurden, werden auch bei den Tellerbelüftern bestätigt. Durch entsprechende Wahl der Belegungs-dichte und der Sauerstoffzufuhr ist auch hier wieder eine Zusammenfassende Darstellung möglich (Abbildung 6-17). Daraus kann man erkennen, daß bei Tellerbelüftern

○ die Gasbelastung deutlich größer ist als bei den Plattenbelüftern.

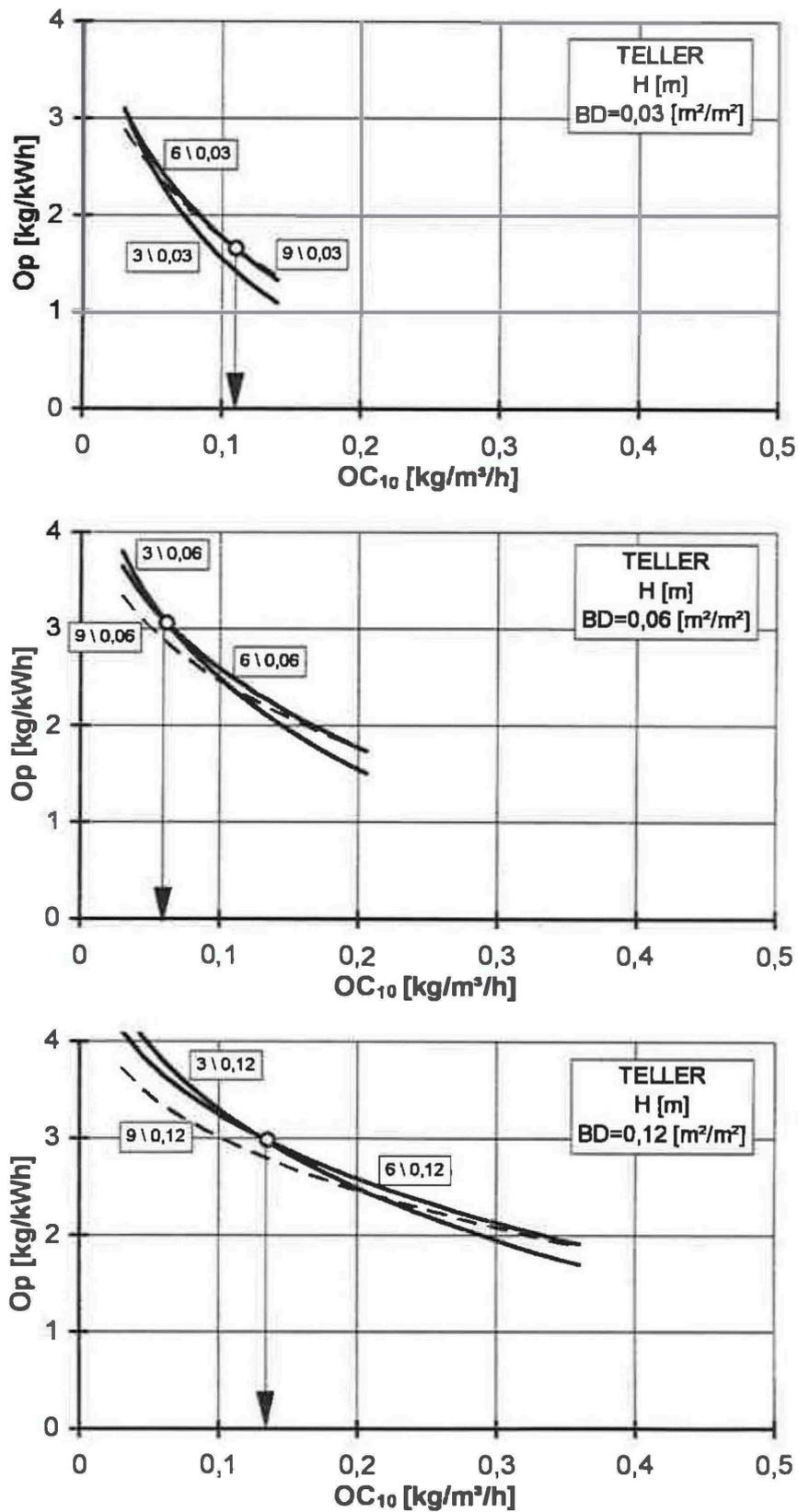
- Bei Belegungsdichten unter 0,03 und einer Sauerstoffzufuhr von mehr als 100 g/m<sup>3</sup>/h ist nur mehr mit Sauerstoffträgen in der Größenordnung von 1,5-2 kg/kWh zu rechnen.
- Bei der Belegungsdichte von 0,12 ist ein Sauerstofftrag von 4 kg/kWh (in Reinwasser bei einer Sauerstoffzufuhr von 50 g/m<sup>3</sup>/h) erreichbar. Dieser Sauerstofftrag liegt ca. 20% unter den Werten der Plattenbelüfter.
- Eine größere Wassertiefe kann, unter der Forderung gleichbleibenden Sauerstofftrages, durch eine Erhöhung der Belegungsdichte kompensiert werden.
- Die Abbildung 6-17 zeigt deutlich, daß die Belegungsdichte BD und die Sauerstoffzufuhr OC austauschbar sind. Die Kurven für BD=0,06 und OC=100 g/m<sup>3</sup>/h und jene für BD=0,12 mit OC=200 g/m<sup>3</sup>/h sind identisch.



**Abbildung 6-17: Sauerstofftrag  $Op$  in Abhängigkeit der Gasbelastung  $v_b$  für unterschiedliche Belegungsdichten, Wassertiefe und Sauerstoffzufuhr für Tellerbelüfter**

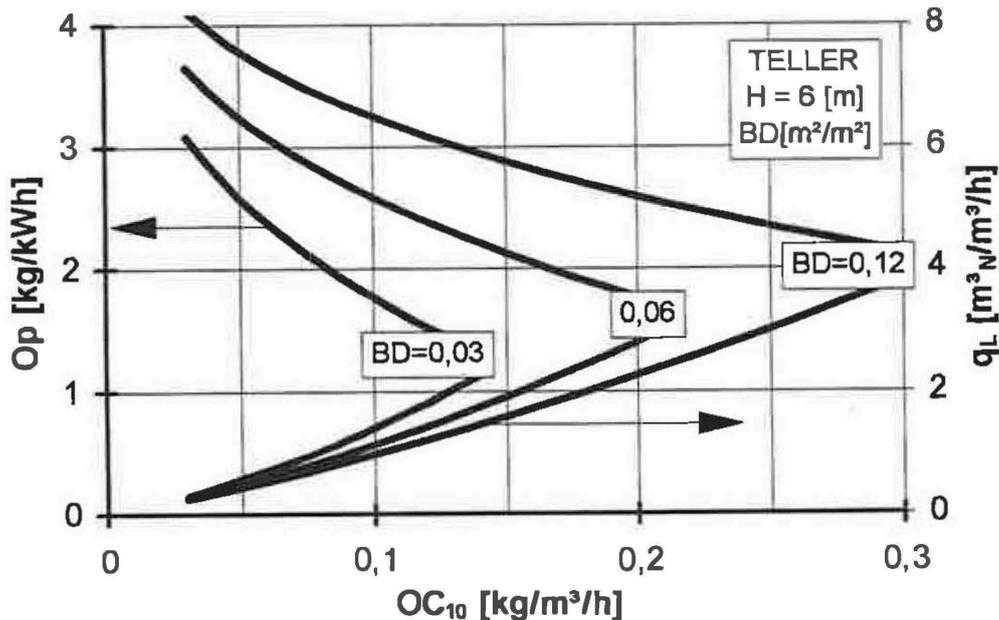
In den Abbildung 6-18 und 6-19 sind die Sauerstoffzufuhr-Charakteristiken für Tellerbelüfter zusammengestellt. Als Parameter wurden Wassertiefen von 3-9 m und Belegungsdichten von 0,03 bis 0,12 gewählt. Aus den Abbildungen können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- Der Sauerstofftrag nimmt mit steigender Belegungsdichte zu.
- Die Wassertiefe hat geringen Einfluß.
- Bei hohen Belegungsdichten erzielt man in flachen Becken einen günstigeren Sauerstofftrag als in tiefen Becken.



**Abbildung 6-18: Sauerstoffertrag  $Op$  in Abhängigkeit der Sauerstoffzufuhr  $OC$  für unterschiedliche Belegungsdichte und Wassertiefe für Tellerbelüfter**

- Bei steigender Sauerstoffzufuhr fallen die Kurven umso stärker je tiefer das Becken wird. Dadurch gibt es Schnittpunkte mit den Linien der anderen Wassertiefen. Die Schnittpunkte bedeuten, daß ab dieser Sauerstoffzufuhr die jeweils größere Wassertiefe den höheren Sauerstoffertrag liefert.
- Bei den Tellerbelüftern liegt die bevorzugte Wassertiefe eher bei 6m. Die „3m“-Kurve ist hier praktisch ab einer Sauerstoffzufuhr von 50 g/m<sup>3</sup>/h immer die ungünstigste.



**Abbildung 6-19: Sauerstoffertrag  $O_p$  und Luftmenge  $q_L$  in Abhängigkeit der Sauerstoffzufuhr  $OC$  für unterschiedliche Belegungs-dichte und 6 m Wassertiefe für Tellerbelüfter**

In der Abbildung 6-19 ist die Sauerstoffzufuhr-Charakteristik für Tellerbelüfter in Reinwasser dargestellt. Zusätzlich ist der Luftvolumenstrom eingetragen. Man erkennt, daß bei einer Erhöhung der Sauerstoffzufuhr eine überproportionale Erhöhung der Luftmenge erforderlich ist. So muß bei einer Erhöhung der Sauerstoffzufuhr von 100 g/m<sup>3</sup>/h auf 200 g/m<sup>3</sup>/h (bei einer Belegungs-dichte von 0,06) die Luftmenge um 140% gesteigert werden. Dadurch sinkt der Sauerstoffertrag.

Bei konstanter Sauerstoffzufuhr ist mit steigender Belegungs-dichte, aufgrund der damit verbundenen höheren Sauerstoffausnutzung, eine geringere Luftmenge erforderlich. Je mehr sich die Luftmengen bei einer konstanten Sauerstoffzufuhr unterscheiden, desto größer ist die Veränderung der Ausnutzung bei geänderter Belegungs-dichte. So ist bei einer Sauerstoffzufuhr von 200 g/m<sup>3</sup>/h bei einer Erhöhung der Belegungs-dichte von 0,06 auf 0,12 eine Reduktion der Luftmenge um ca. 17% feststellbar.

### 6.1.3 Rohrbelüfter

In diesem Abschnitt werden die Meßergebnisse der Anlagen auf denen Rohrbelüfter im Einsatz sind betrachtet. In dieser Gruppe werden Schlauchbelüfter (flexible Membran) und Kerzenbelüfter zusammengefaßt. Die angegebenen Resultate beziehen sich auf Messungen in Reinwasser. Bei der Versuchsdurchführung wurde entsprechend der ÖNORM 5888 bzw. nach ATV (1995) vorgegangen.

Die übliche Belegungsichte liegt in der Größenordnung von 20 bis 30 %. Aufgrund der Festlegung, daß als abgasende Fläche die gesamte Mantelfläche berücksichtigt wird, sind Belegungsichten größer als 100% möglich. Solch eine dichtest mögliche Anordnung wurde auf der Anlage „Leop“ mit einer Belegungsichte = 128 % realisiert.

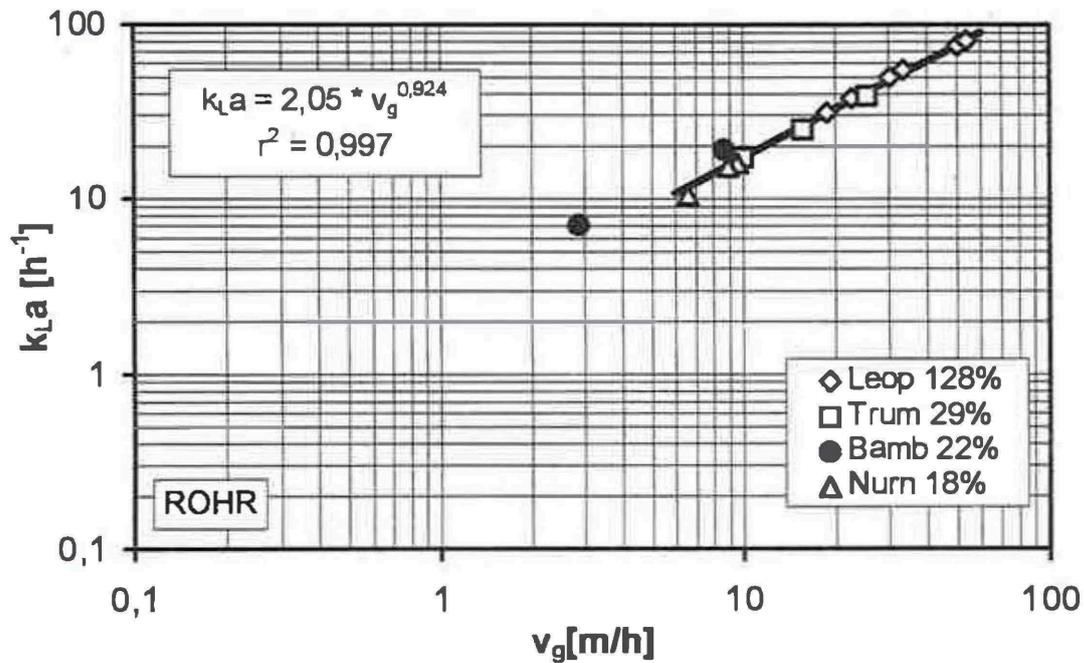
Die Datenbasis umfaßt 4 Belebungsanlagen (12 Versuche in der Korrelation berücksichtigt). Bei Rohrbelüftern zeigt sich, daß die belegte Bodenfläche zwischen etwa 18 bis 30% (128 %) schwankt.

**Tabelle 6-3: Anlagen Rohrbelüfter**

Anlage	Beckentyp	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Tiefe [m]	Belüfterart	Belegung [%]
Nürn	Misch	1490	6,6	Kerze	18
Bamb*	Misch	1750	4,9	Kerze	22
Trum	Misch	710	4,9	Schlauch	29
Leop	Misch	180	2,9	Schlauch	128

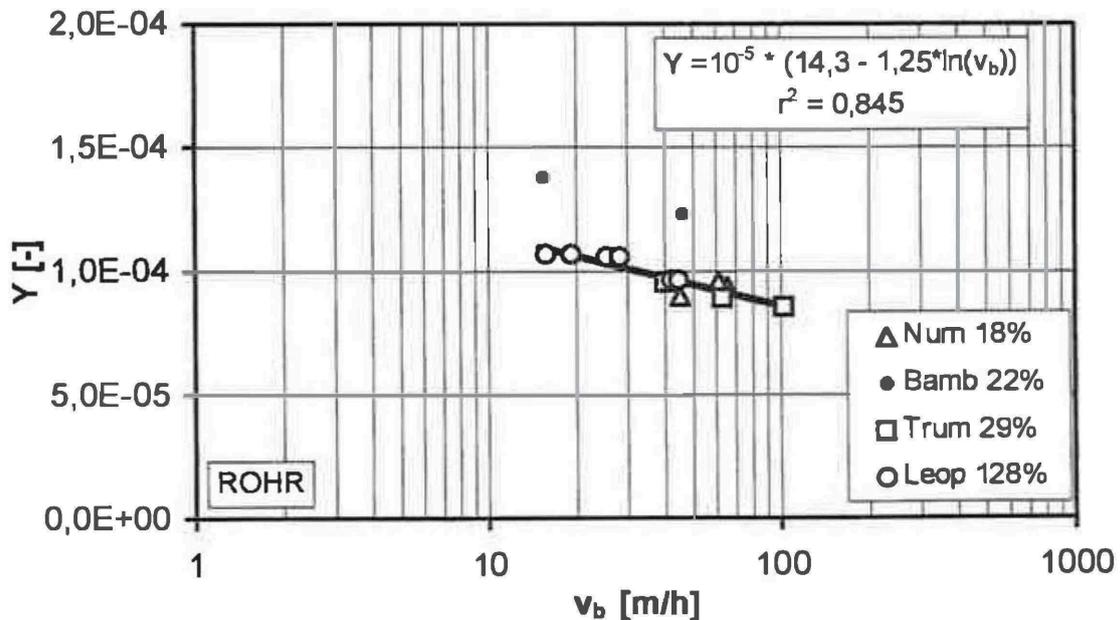
Die in obiger Tabelle mit \* bezeichneten Werte wurden bei der Berechnung der Ausgleichsgerade nicht berücksichtigt.

Es wird eine gemeinsame Beurteilung von Kerzen und Schlauchbelüftern vorgenommen. Die Meßwerte sind in den Abbildungen 6-20 und 6-21 dargestellt. Die auftretende Gasbelastung liegt zwischen 10 und 50 m<sup>3</sup><sub>N</sub>/m<sup>2</sup>/h also etwa in der Mitte zwischen den Plattenbelüftern und den Tellerbelüftern.



**Abbildung 6-20: Belüftungskoeffizient  $k_{La}$  in Abhängigkeit der Gasgeschwindigkeit  $v_g$  für Rohrbelüfter in REINWASSER**

Die Resultate der Anlage „Bamb“ liegen höher als die anderen Meßwerte (Abbildung 6-21). Die Gaszerteiler waren statt poröse Kerzen. Die Beckensohle war flächig belegt und der Beckengrundriß nahezu quadratisch. Ein Grund für die höheren Werte konnte nicht gefunden werden.



**Abbildung 6-21: Sorptionskennzahl  $Y$  in Abhängigkeit der Gasbelastung  $v_b$  für Rohrbelüfter in REINWASSER**

Die Verwendung der Korrelation für die Rohrbelüfter lautet:

$$Y = 10^{-5} * (14,33 - 1,25 * \ln \frac{q_{LN} * H}{BD}) \quad r^2=0,845 \quad \text{Gleichung 6-7}$$

Damit und mit Gleichung 6-3 wird mit entsprechenden Annahmen für die Wassertiefe, die Belegungsdichte und die Sauerstoffzufuhr der erforderliche Luftvolumenstrom berechnet. Mit diesem und der Gleichung 5-20 für die Leistungsaufnahme von Drehkolbenverdichtern wird der Sauerstofftrag berechnet. Die Resultate der Berechnung sind in den Abbildungen 6-22 bis 6-24 dargestellt.

Prinzipiell gelten die selben Aussagen wie in den vorigen Abschnitten, man erkennt:

- Mit sinkender Belegungsdichte oder steigender Sauerstoffzufuhr (und damit steigender Gasbelastung) wird die Veränderung des Sauerstofftrages bei steigender Wassertiefe geringer (die Kurven werden flacher).
- Die optimale Wassertiefe bewegt sich zwischen den Werten für Platten und Tellerbelüfter.
- Die optimale Wassertiefe liegt hier in Abhängigkeit der Wassertiefe eng beisammen, ähnlich wie bei den Plattenbelüftern, aber bei etwas höheren Werten.
- Eine Steigerung der Belegungsdichte von  $BD=0,1$  auf  $0,2$  wirkt sich wesentlich stärker aus als von  $BD=0,2$  auf  $0,4$ .
- Die Wassertiefe und die Belegungsdichte sind unter der Forderung gleicher Sauerstoffzufuhr und konstantem Sauerstofftrag in gewissen Grenzen austauschbar.
- Die Abbildung 6-24 zeigt deutlich, daß die Belegungsdichte  $BD$  und die Sauerstoffzufuhr  $OC$  austauschbar sind. Die Kurven für  $BD=0,2$  und  $OC=100 \text{ g/m}^3/\text{h}$  und jene für  $BD=0,4$  mit  $OC=200 \text{ g/m}^3/\text{h}$  sind identisch.
- Bei der einer Belegungsdichte von 40% ist ein Sauerstofftrag von  $4 \text{ kg/kWh}$  (in Reinwasser!) erreichbar. Dieser hohe Sauerstofftrag wird aber nur bei einer geringen Sauerstoffzufuhr von ca.  $50 \text{ g/m}^3/\text{h}$  erreicht.

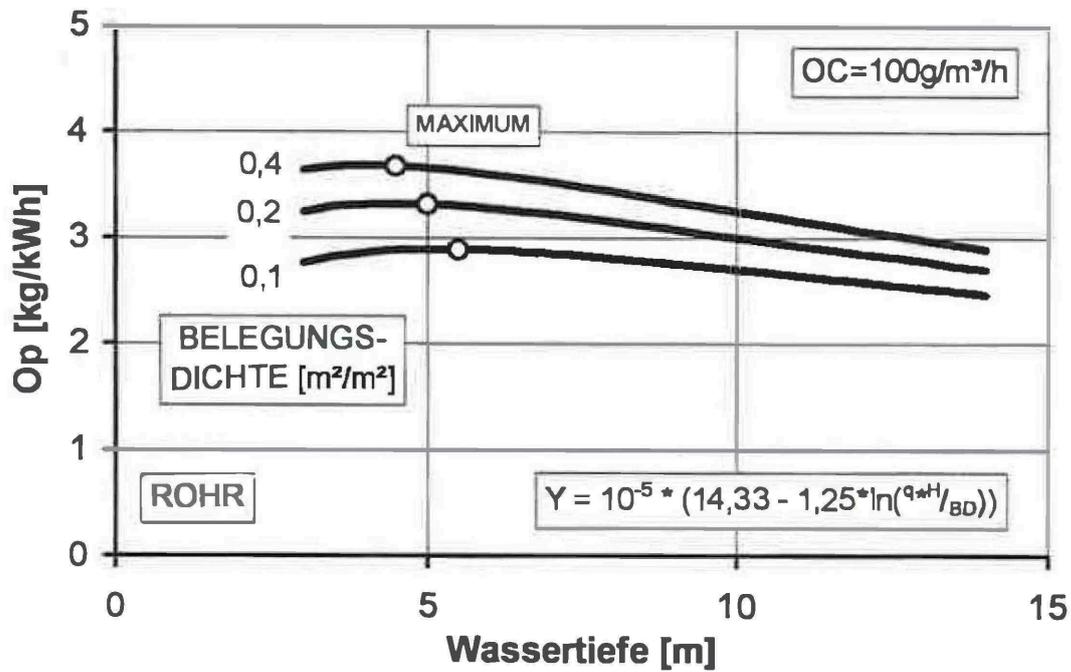


Abbildung 6-22: Sauerstoffertrag  $Op$  in Abhängigkeit der Wassertiefe für unterschiedliche Belegungs-dichte und einer Sauerstoffzufuhr von  $100 g/m^3/h$  für Rohrbelüfter

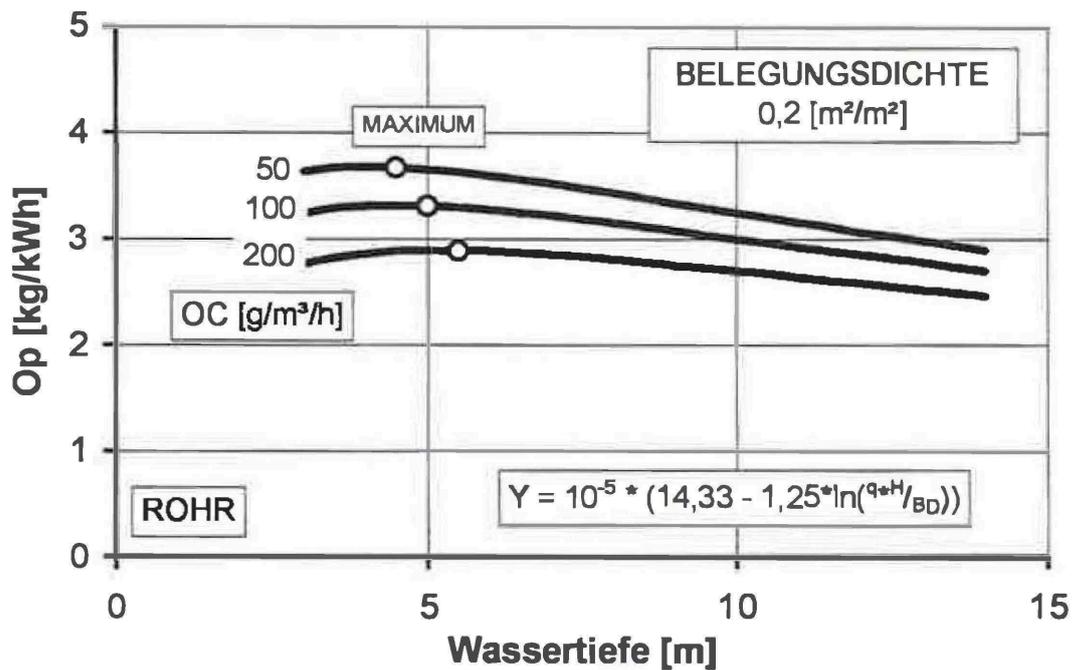
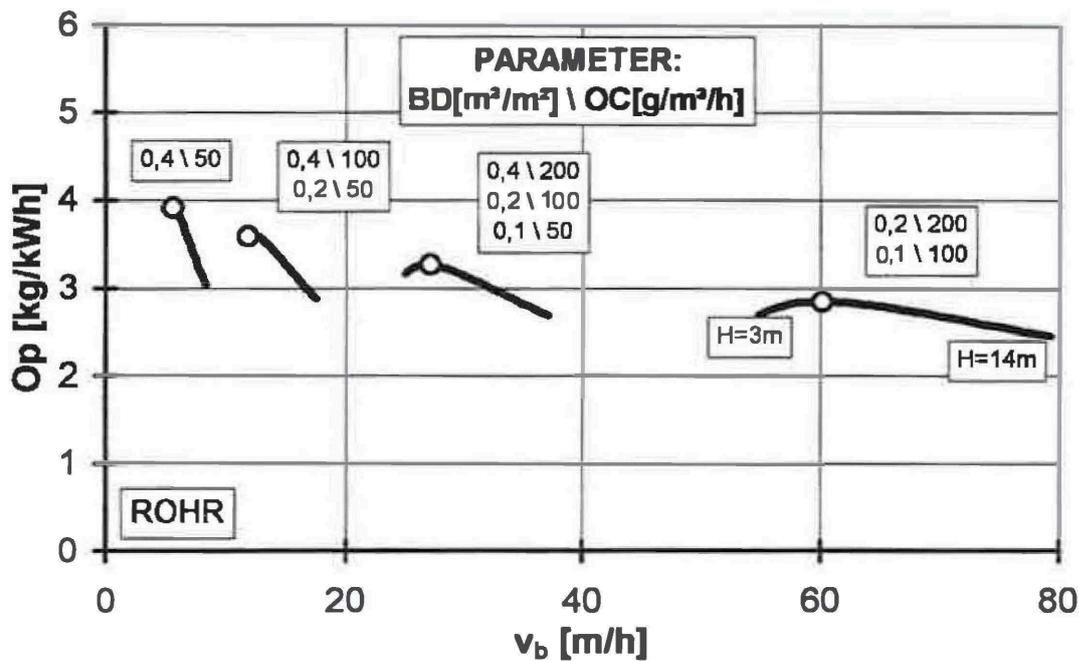


Abbildung 6-23: Sauerstoffertrag  $Op$  in Abhängigkeit der Wassertiefe für unterschiedliche Sauerstoffzufuhr bei einer Belegungs-dichte von  $0,2$  für Rohrbelüfter

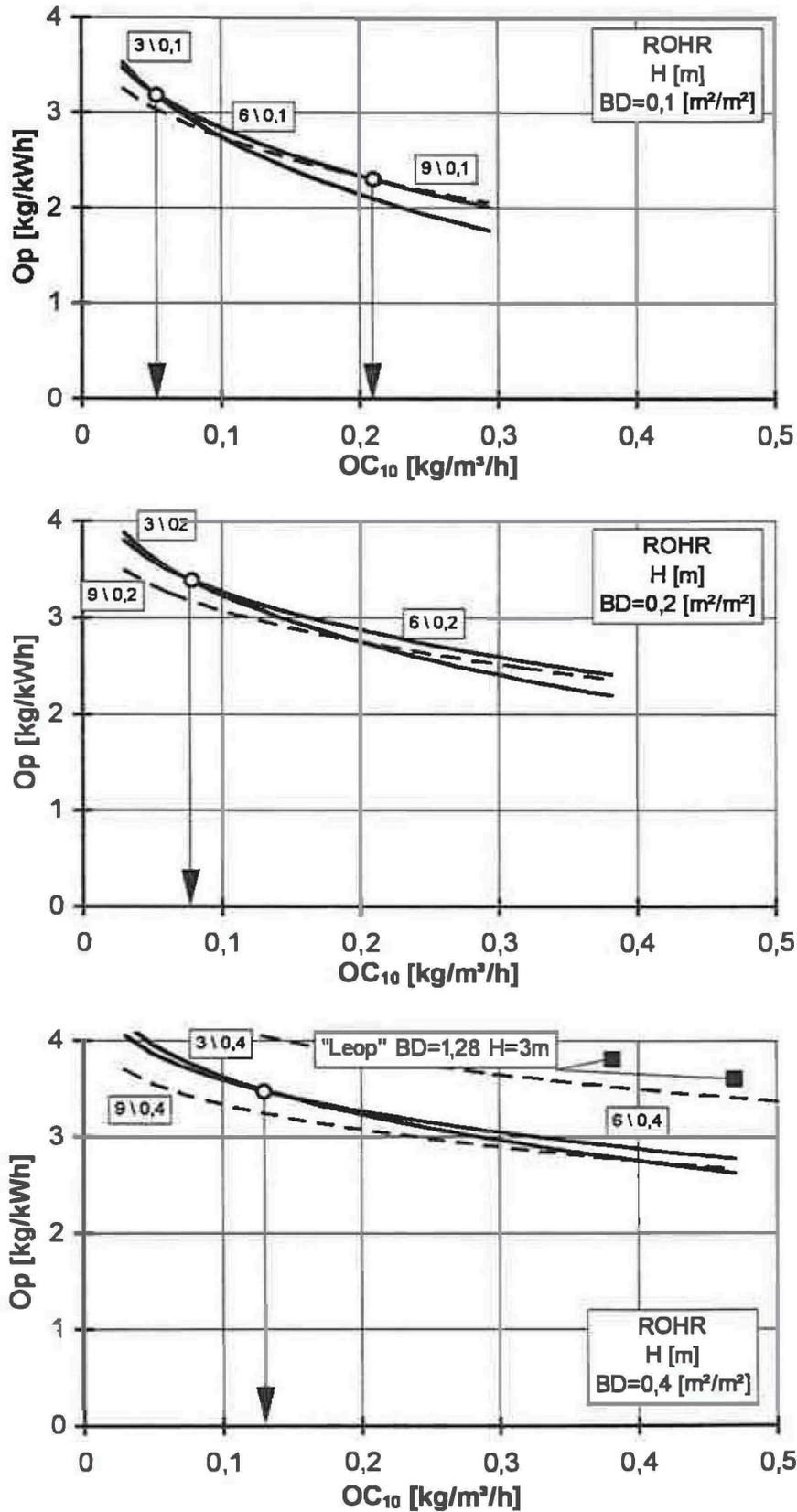


**Abbildung 6-24: Sauerstoffertrag  $Op$  in Abhängigkeit der Gasbelastung  $v_b$  für unterschiedliche Belegungsdichte, Wassertiefe und Sauerstoffzufuhr für Rohrbelüfter**

Rohrbelüfter liegen mit den entsprechenden Abhängigkeiten in der Mitte zwischen den Platten und den Tellerbelüftern.

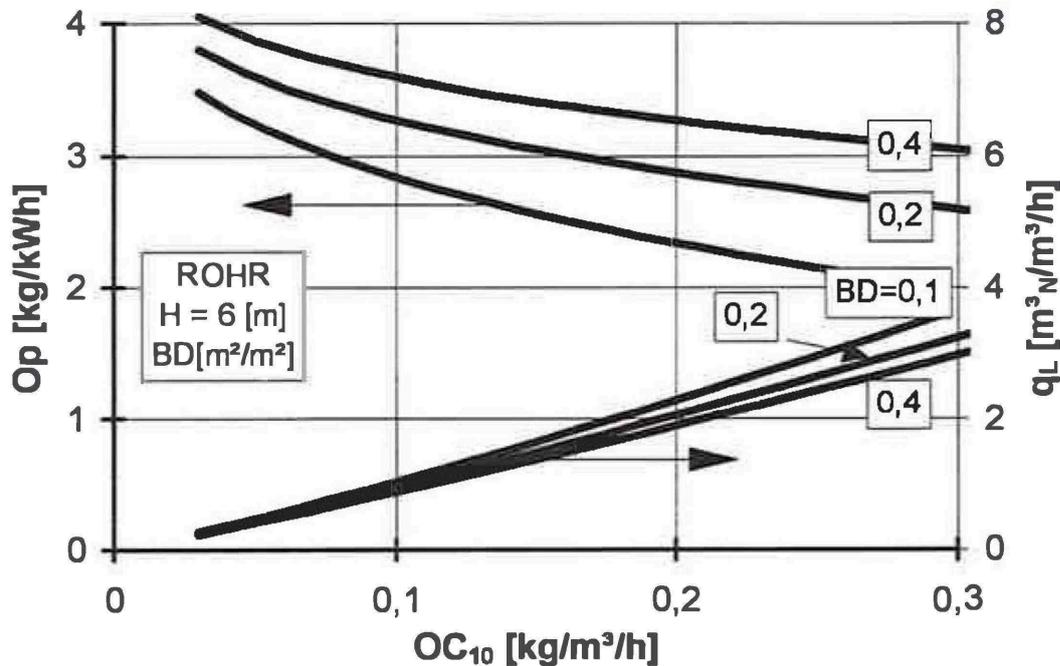
In den Abbildung 6-25 und 6-26 sind die Sauerstoffzufuhr-Charakteristiken für Rohrbelüfter zusammengestellt. Als Parameter wurden Wassertiefen von 3-9 m und Belegungsdichten von 0,1 bis 0,4 gewählt. Auch bei den Rohrbelüftern zeigten sich die selben Tendenzen wie zuvor bei den bei den Tellerbelüftern.

- Die Wassertiefe hat geringen Einfluß.
- Der Sauerstoffertrag nimmt mit steigender Belegungsdichte zu.
- Die Wassertiefe von 6m ist über weite Bereiche der Sauerstoffzufuhr als optimal zu betrachten.
- Bei steigender Sauerstoffzufuhr fallen die Kurven umso stärker je tiefer das Becken wird. Dadurch gibt es Schnittpunkte mit den Linien der anderen Wassertiefen. Die Schnittpunkte bedeuten, daß ab dieser Sauerstoffzufuhr die jeweils größere Wassertiefe den höheren Sauerstoffertrag liefert.
- Bei geringer Belegungsdichte bzw. großer Sauerstoffzufuhr ist es letztlich gleichgültig ob ein 4 oder 8 m tiefes Becken zur Ausführung gelangt.



**Abbildung 6-25: Sauerstoffertrag  $Op$  in Abhängigkeit der Sauerstoffzufuhr  $OC$  bei unterschiedlichen Belegungsdichte und Wassertiefe für Rohrbelüfter**

In der Abbildung 6-25 sind die Sauerstoffzufuhr-Charakteristiken für die Rohrbelüfter dargestellt. Zusätzlich sind die Meßwerte der Anlage „Leop“ eingetragen. Die strichlierte Linie ist die Sauerstoffzufuhr-Charakteristik für diese Anlage. Man erkennt, daß die Werte ca. 10% darüber liegen, was als gute Übereinstimmung bewertet werden kann.



**Abbildung 6-26: Sauerstoffertrag  $O_p$  in Abhängigkeit der Sauerstoffzufuhr für unterschiedliche Belegungsdichte und 6m Wassertiefe für Rohrbelüfter**

In der Abbildung 6-26 ist die Sauerstoffzufuhr-Charakteristik für Plattenbelüfter in Reinwasser dargestellt. Zusätzlich ist der Luftvolumenstrom eingetragen. Man erkennt, daß bei einer Erhöhung der Sauerstoffzufuhr eine überproportionale Erhöhung der Luftmenge erforderlich ist. So muß bei einer Erhöhung der Sauerstoffzufuhr von  $100 \text{ g/m}^3/\text{h}$  auf  $200 \text{ g/m}^3/\text{h}$  (bei einer Belegungsdichte von 0,1) die Luftmenge um 140% gesteigert werden. Dadurch sinkt der Sauerstoffertrag.

Bei konstanter Sauerstoffzufuhr ist mit steigender Belegungsdichte, aufgrund der damit verbundenen höheren Sauerstoffausnutzung, eine geringere Luftmenge erforderlich. Je mehr sich die Luftmengen bei einer konstanten Sauerstoffzufuhr unterscheiden, desto größer ist die Veränderung der Ausnutzung bei geänderter Belegungsdichte. So ist bei einer Sauerstoffzufuhr von  $200 \text{ g/m}^3/\text{h}$  bei einer Erhöhung der Belegungsdichte von 0,2 auf 0,4 eine Reduktion der Luftmenge um ca. 7% feststellbar.

## 6.2 Gaszerteiler in Belebtschlamm

Neben den Messungen in Reinwasser wurden auch Messungen in Belebtschlamm durchgeführt. Die Anlagendaten sind in Tabelle 6-4 zusammengestellt. Die Untersuchungen erfolgten mit den in Kapitel 3 beschriebenen Methoden.

Die Datenbasis zur Beurteilung von Gaszerteilereinflüssen auf den Sauerstoffübergang in „Belebtschlamm-Abwasser-Gemisch“ ist deutlich kleiner als für Reinwasser. Eine Aussage über das Verhalten einzelner Gaszerteilertypen ist daher nicht möglich

**Tabelle 6-4: Anlagen Druckluft Belebtschlamm**

Anlage	Beckentyp	Volumen [m³]	Tiefe [m]	Belüfterart	Belegung [%]
Purg	Misch	500	3,9	Platte	65
Wrne	Misch	1270	4,0	Platte	44
Stmi	Misch	550	4,5	Platte	39
Leop	Misch	180	2,9	Rohr	128
Lalt	Umlauf	2800	6,1	Rohr	8
Lneu	Umlauf	2800	6,1	Teller	13
L42n	Umlauf	2800	6,1	Teller	13
L23n	Umlauf	2800	6,1	Teller	13
Blu1	Umlauf	3970	4,5	Teller	3,6
Blu2	Umlauf	3970	4,5	Teller	1,4

Für Umlaufbecken gelten die selben Aussagen wie für Reinwasser.

Auf manchen Anlagen wurden die Gaszerteiler ausgetauscht, daher waren Messungen mit unterschiedlichen Konfigurationen möglich. Für die Diskussion der Versuchsergebnisse werden sie daher zunächst in der gleichen Form wie die Reinwasserergebnisse dargestellt (Abbildungen 6-27 und 6-28).

Die Tendenzen sind ähnlich den Reinwasserergebnissen, die Streuungen sind aber deutlich größer. Für Absolutwerte von Y gilt die Abbildung 6-3.

Eine Untergrenze ist abschätzbar, sie ist in der Abbildung 6-28 eingetragen.

Es kann aber auch aus der Beziehung für die Untergrenze,

$$Y = 10^{-5} * (11,2 - 1,22 * \ln \frac{q_L * H}{BD}) \quad \text{Gleichung 6-8}$$

mit Gleichung 6-3 eine Sauerstoffzufuhr-Charakteristik als „Minimalvariante“ erstellt werden. Diese zeigt die Abbildung 6-29:

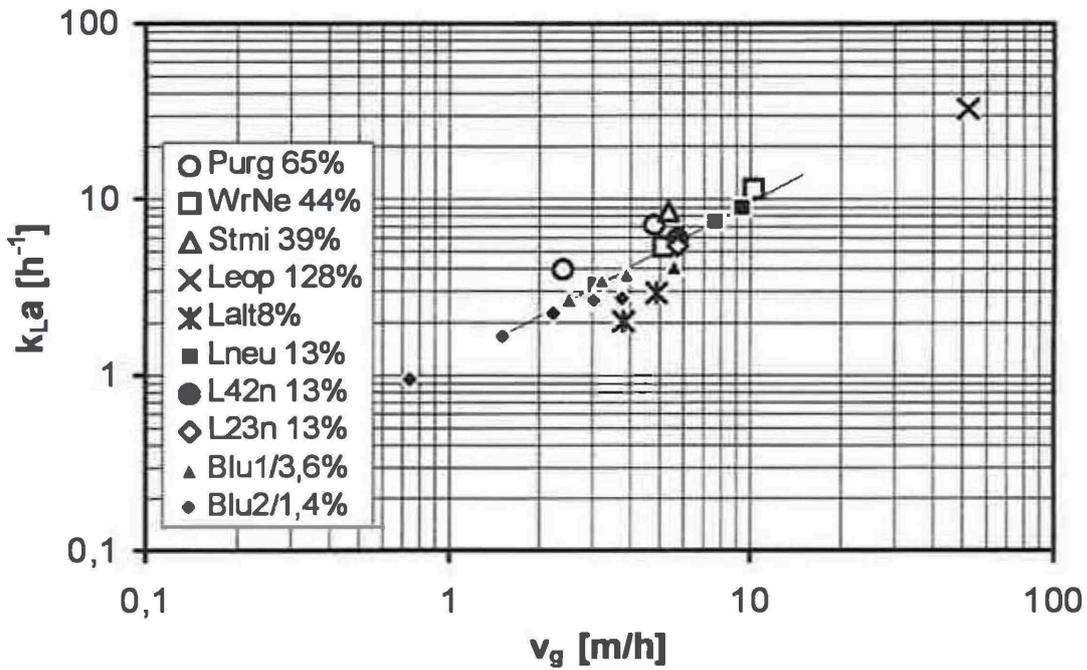


Abbildung 6-27: Belüftungskoeffizient  $k_{La}$  in Abhängigkeit der Gasgeschwindigkeit  $v_g$  für Druckbelüftung in Belebtschlamm

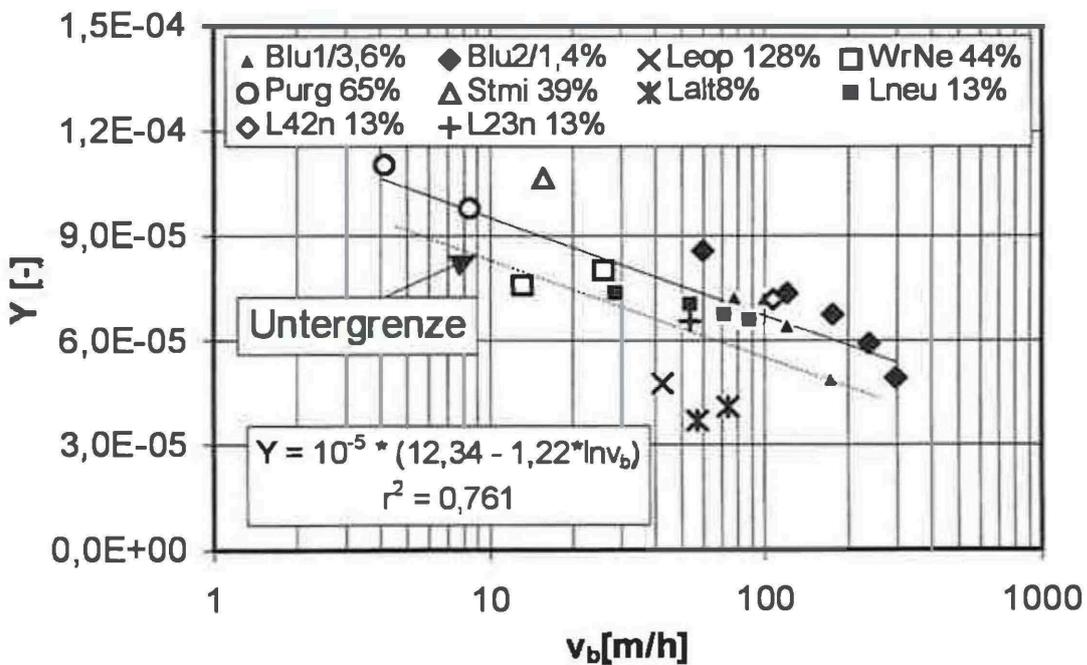
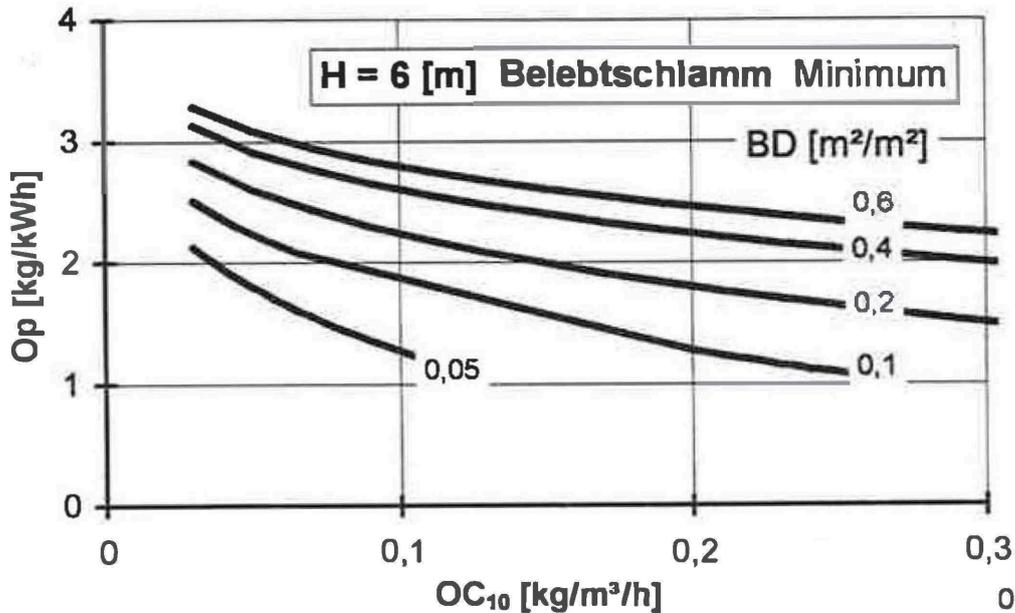


Abbildung 6-28: Sorptionskennzahl  $Y$  in Abhängigkeit der Gasbelastung  $v_b$  für Druckbelüftung in Belebtschlamm



**Abbildung 6-29: Sauerstoffertrag Op in Abhängigkeit der Sauerstoffzufuhr OC für unterschiedliche Belegungsdichte**

Es ist festzuhalten, daß die daraus abgelesenen Werte Minimalwerte sind die im Einzelfall deutlich größer sein können und sollen!

Unter Betriebsbedingungen ist in der Regel, unter sonst gleichen Bedingungen, mit einer verminderten Sauerstoffzufuhrleistung des Belüftungssystemes zu rechnen (siehe auch Kapitel 2.3.3). Die Verminderung der Sauerstoffzufuhr unter Betriebsbedingungen im Vergleich zu Reinwasser wird mit dem „Grenzflächenfaktor“ (ATV 1995) angegeben. Er wird nach folgender Definition berechnet:

$$\alpha = \frac{k_L a_{20} \text{ in belebtem Schlamm}}{k_L a_{20} \text{ in Reinwasser}} \quad \text{Gleichung 6-9}$$

Er ist aber auch aus den Sorptionskennzahlen abschätzbar. Dazu wird die Beziehung

$$\alpha' = \frac{Y \text{ in belebtem Schlamm}}{Y \text{ in Reinwasser}} \quad \text{Gleichung 6-10}$$

verwendet. Als Bezugstemperatur bei allen Auswertungen wurde 10°C verwendet. Die Sorptionskennzahl ist damit auch auf 10°C bezogen. Mit der Gleichung 6-10 berechnet man aus der Sorptionskennzahl für Reinwasser (Gleichung 6-1) und für Belebtschlamm (Gleichung 6-8) einen  $\alpha'$ -Wert von 0,65. Dieser  $\alpha'$ -Wert ist identisch mit dem bei Versuchen immer wieder festgestellten  $\alpha$ -Wert von 0,6-0,7. Für die Auslegung von Belüftungseinrichtungen sollte immer ein  $\alpha$ -Wert kleiner gleich 0,65 zum Ansatz gelangen.

Die unter den Bezeichnungen „Lalt“, „Lneu“, „L42n“ und „L23n“ angegebenen Resultate beziehen sich alle auf die selbe Anlage. Das Belebungsbecken war als Umlaufbecken ausgeführt. Die Resultate unterscheiden sich folgendermaßen:

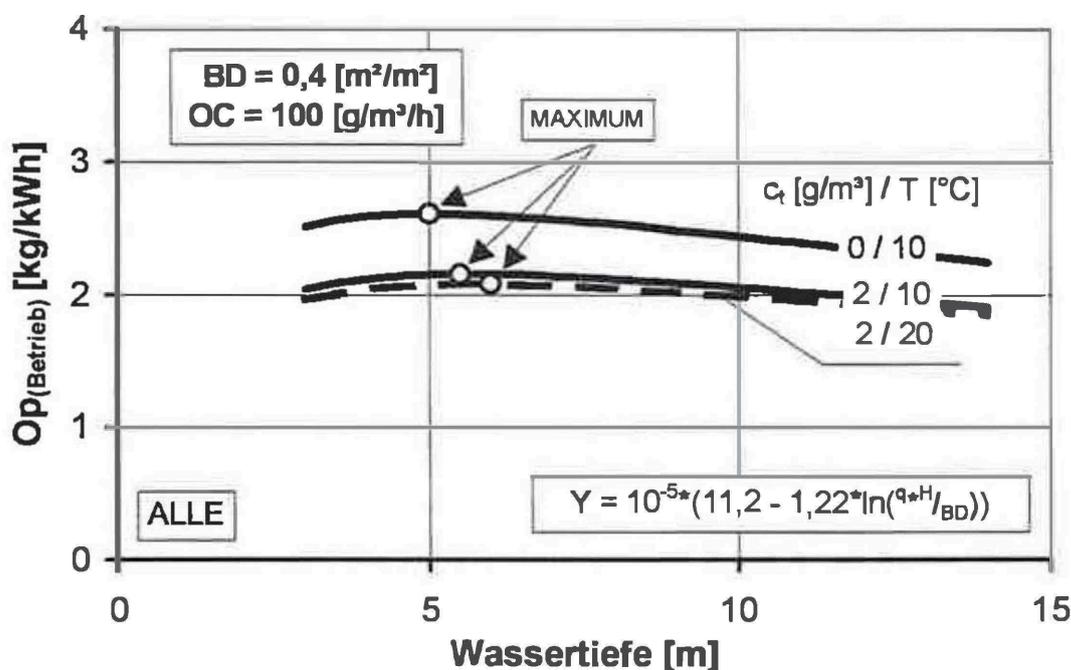
- „Lalt“: Hier war noch das „alte“ Belüftungssystem in Betrieb. Es bestand aus 600 starr porösen Belüfterteller in 4 Gruppen und war ca. 6 Jahre im Einsatz. Zur Mischung waren drei Rührwerke ( $n=700\text{min}^{-1}$ ) vorhanden und in Betrieb.
- „Lneu“: Bei diesen Messungen war das Belüftungssystem umgebaut worden. Es waren 1500 Membranteller in 4 Gruppen installiert und in Betrieb. Für die Strömungserzeugung waren 3 langsam laufende ( $n$  ca.  $60\text{min}^{-1}$ ) Rührwerke während der Messung in Betrieb.
- „L43n“: Das Belüftungssystem wie „Lneu“ aber nur 2 Belüftergruppen in Betrieb.
- „L23n“: Das Belüftungssystem wie „Lneu“ aber nur 2 der 3 Rührwerke in Betrieb

Es wurden jeweils mit verschiedenen Luftmengen Versuche durchgeführt. Eine Luftmenge wurde, mit Ausnahme von „Lalt“, bei allen drei Betriebsvarianten des Belüftungssystemes untersucht. Damit ist ein direkter Vergleich möglich. Die Resultate der Messung „Lalt“ liegen deutlich unter allen anderen Messungen. Die Entscheidung hier das Belüftungssystemen zu erneuern war sicher richtig. Interessant sind aber die Resultate der Messungen „L42n“ und „L23n“. Man erkennt, daß bei „L42n“ trotz der gestiegenen Gasbelastung die Sorptionskennzahl gleich bleibt. Normalerweise sinkt die Sorptionskennzahl mit steigender Gasbelastung. Dies wird auf die Strömungsverhältnisse zurückgeführt. Wenn nun  $Y$  trotz steigender Gasbelastung gleich bleibt, kann gefolgert werden, daß sich die einzelnen Gruppen untereinander beeinflussen.

Die Messung „L23n“ wurde mit der gleichen Luftmenge aber geringerer zusätzlicher Strömungsenergie durchgeführt. Die Meßwerte zeigen, daß die erreichte Sorptionskennzahl nur geringfügig kleiner war als bei den Versuchen mit drei Strömungsbildnern. Dies bestätigt aber dennoch die Beobachtungen, daß die Sauerstoffzufuhr mit steigender Umwälzenergie steigt (vergleiche Kapitel 6)

Die Anlage „Leop“ ist ein hochbelastetes Mischbecken, das der eigentlichen Belebungsanlage vorgeschaltet ist (Selektor). Das Abwasser wird darin nur vorbehandelt. Da das Becken vollständig abgedeckt war, konnte die Abluft erfaßt, und die Sauerstoffzufuhr mit einer Gasbilanz (siehe Kapitel 3.1) ermittelt werden. Der angegebene Datenpunkt ist der Mittelwert aus 6 Einzelmessungen (die Streuung war  $\pm 10\%$ ). Man erkennt, daß er deutlich unter den anderen Werten liegt.

Der sich einstellende Sauerstoffgehalt war etwa  $1 \text{ g/m}^3$  und die Trockensubstanz betrug  $8 \text{ g/m}^3$ . Die Atmung lag bei ca.  $350 \text{ g/m}^3/\text{h}$ , diese sehr hohe Atmung brachte keine Verbesserung der Sauerstoffzufuhr (siehe Kapitel 2.3.3). Der auf dieser Anlage ermittelte  $\alpha$ -Wert=0,4 bestätigt die Beobachtung, daß bei der Teilreinigung niedrigere  $\alpha$ -Werte auftreten (ATV 1985).



**Abbildung 6-30: Sauerstoffertrag  $Op$  in Abhängigkeit der Wassertiefe bei unterschiedlichen Sauerstoffgehalten und Temperaturen im Belebungsbecken BELEBTSCHLAMM**

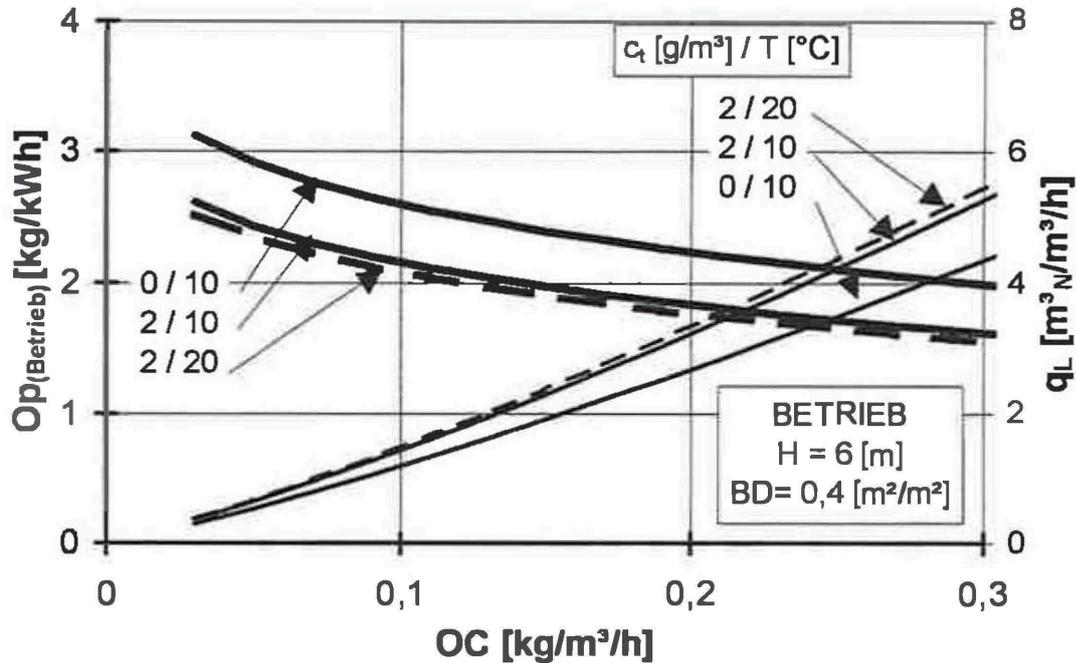
Mit der als „Untergrenze“ formulierten Korrelation wurde Abbildung 30 erstellt. Darin ist der Sauerstoffertrag für einen Sauerstoffgehalt von 0 und von  $2 \text{ g/m}^3$  im Belebungsbecken berechnet. Man erkennt, daß dadurch der Absolutwert des Sauerstoffertrages deutlich reduziert wird und sich die Beckentiefe bei der das Maximum auftritt zu größeren Tiefen verschiebt.

Eine Erklärung dieses Sachverhaltes ist folgendermaßen möglich. Durch den Sauerstoffgehalt größer Null sinkt die Konzentrationsdifferenz. Dadurch wird die Sauerstoffzufuhr ( $k_L a \cdot c$ ) kleiner. Um sie konstant zu halten ist  $k_L a$  zu vergrößern, was durch eine Erhöhung der Luftmenge möglich ist. Man benötigt also für die gleiche Sauerstoffzufuhr einen größeren Luftvolumenstrom wodurch der Sauerstoffertrag sinkt.

Eine steigende Temperatur im Belebungsbeckens hat die gleichen Auswirkungen. Auch hier verringert sich die Konzentrationsdifferenz wodurch nochmals der Sauerstoffertrag sinkt und die die Beckentiefe bei der das Maximum auftritt

steigt. Auch diese für einen Sauerstoffgehalt von  $2 \text{ g/m}^3$  und  $20^\circ\text{C}$  berechnete Kurve ist in Abbildung 30 eingetragen.

Man erkennt, daß im Normalbetrieb (als Minimalwert) etwa mit Sauerstofferträgen von ca.  $2 \text{ kg/kWh}$  zu rechnen ist.



**Abbildung 6-31: Sauerstoffertrag  $Op$  in Abhängigkeit der Sauerstoffzufuhr  $OC$  bei unterschiedlichen Sauerstoffgehalten und Temperaturen in BELEBTSCHLAMM**

In Abbildung 6-31 ist die Sauerstoffzufuhr-Charakteristik bei unterschiedlichen Sauerstoffgehalten und Temperaturen im Belebungsbecken dargestellt. Man erkennt, daß unter realen Betriebsbedingungen eines Belebungsbeckens mit deutlich geringeren „Sauerstofferträgen“ zu rechnen ist als in Reinwasser bei Sauerstoffgehalt Null.

Der in den Abbildungen 6-30 und 6-31 dargestellte Sauerstoffertrag ist für die Fälle  $c_t = 2 \text{ g/m}^3$  und  $T = 20^\circ\text{C}$  nicht auf Standardbedingungen bezogen. Dieser Sauerstoffertrag charakterisiert den aktuellen Systemzustand und bestimmt den Energieverbrauch im laufenden Betrieb. Dieser Sachverhalt kann auch durch die in der Abwassertechnik übliche Umrechnung des Sauerstoffverbrauches auf die erforderliche Sauerstoffzufuhr mit der Beziehung  $OC = OV \cdot \frac{c_s}{c_s - c_t}$  dargestellt werden.

### 6.3 Düsenbelüfter Reinwasser

Bei Düsenbelüftern wird die Luft mittels der kinetischen Energie eines Wasserstrahles in feine Blasen zerteilt. Die Sorptionskennzahl ist vom Verhältnis dieser Mischleistung zur Luftmenge, der Gasdispergier-Kennzahl  $X$ , abhängig. Zur Berechnung der Gasdispergierkennzahl wurden die auf den Anlagen gemessenen Leistungen verwendet. In Ermangelung der Kennlinien für die Pumpen und Pumpenantriebe war nicht feststellbar mit welchem Gesamtwirkungsgrad das Treibwasser gepumpt wurde. Die Resultate sind daher mit dem mittleren Wirkungsgrad aller Anlagen und Versuche behaftet.

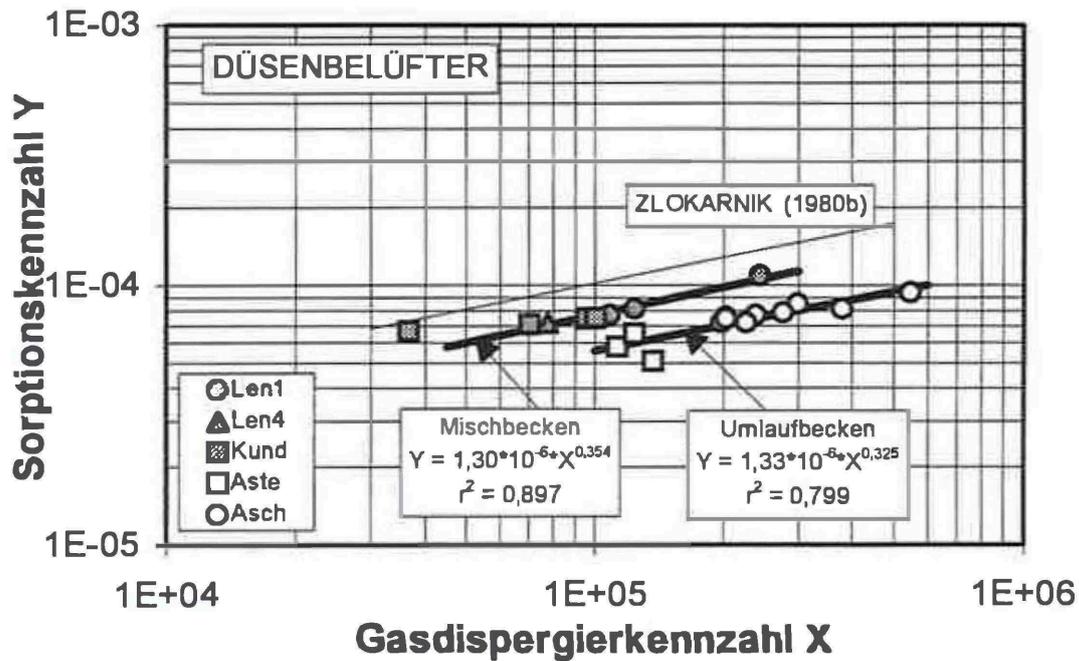
Es wurden Messungen auf 5 großtechnischen Anlagen, die mit dem gleichen Düsensystem ausgerüstet waren, durchgeführt. Die Anlagendaten sind in Tabelle 6-5 zusammengefaßt. Die Düsen haben unterschiedliche Düsendurchmesser für den Treibwasserstrahl. Wie die Abbildung 6-32 zeigt, ist eine Trennung in Misch und Umlaufbecken möglich.

**Tabelle 6-5: Anlagen Düsenbelüfter**

Anlage	Beckentyp	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Tiefe [m]	Düsen Ø [mm] Wasser/Luft
Len1	Misch	7000	11,4	25/22
Len4	Misch	1940	9,7	25/22
Kund*	Misch	2440	10,7	30/36
Aste	Umlauf	11000	7,5	38/80
Asch	Umlauf	2450	7,9	30/36

Die in obiger Tabelle mit \* bezeichneten Werte wurden in die Berechnung der Ausgleichsgeraden nicht einbezogen. Die Anlage „Kund“ liegt deutlich über der Korrelation. Ein möglicher Grund ist die Beckengeometrie. Das Becken hatte einen halbkugelförmigen Boden.

In der Abbildung 6-32 ist auch eine Korrelation für einen anderen Düsenbelüfter (ZLOKARNIK 1980b) aufgenommen. Die Sorptionskennzahlen liegen deutlich über den eigenen Werten. Die Absolutwerte von  $Y$  liegen in der gleichen Größenordnung wie die der Gaszerteiler.



**Abbildung 6-32: Sorptionskennzahl Y in Abhängigkeit der Gasdispersionkennzahl X für Düsenbelüfter in REINWASSER**

Die vorliegenden Daten erlauben eine getrennte Auswertung von Misch- und Umlaufbecken. Man ermittelt folgende Korrelation:

$$Y = a \cdot X^b \quad \text{Gleichung 6-11}$$

**Tabelle 6-6: Koeffizienten zur Berechnung der Sorptionskennzahl von Düsenbelüftern**

	a	b	r <sup>2</sup>
Mischbecken	1,30·10 <sup>-6</sup>	0,345	0,897
Umlaufbecken	1,33·10 <sup>-6</sup>	0,325	0,799

Durch Einsetzen der Definitionen für Y und X in Gleichung 6-11 und entsprechende Umformung kann die Leistung des Treibwasserstrahles bezogen auf das Beckenvolumen [W/m<sup>3</sup><sub>BB</sub>] berechnet werden:

$$P_w = q_{ET} \cdot \left( \frac{OC_{10}}{a \cdot H \cdot \Delta c_{log} \cdot q_{ET/2}} \right)^{1/b} \cdot \rho(vg)^{2/3} \cdot \left( \frac{v^2}{g} \right)^{1/3b} \quad \text{Gleichung 6-12}$$

Die Indizes der Luftmenge bedeuten, daß der Luftvolumenstrom bei  $q_{ET}$  auf den Systemdruck in Einblastiefe und bei  $q_{ET/2}$  auf den Druck in halber Beckentiefe umgerechnet ist. Durch das frei festlegbare Verhältnis Treibwasservolumenstrom zu Luftvolumenstrom ist naheliegend, daß für eine gewählte Sauerstoffzufuhr und Wassertiefe ein optimales Verhältnis existiert.

Gibt man eine Wassertiefe, eine Sauerstoffzufuhr und eine Luftmenge vor, so kann man die optimale Treibwasserleistung berechnen. Darin sind

- die Wirkungsgrade der auf den untersuchten Anlagen im Einsatz befindlichen Pumpen
- die Verluste des Rohrleitungssystems und
- die Verluste der Düsenbelüfter enthalten.

Für die Berechnung der Leistung der Luftverdichter wird der unter Gleichung 5-20 eingeführte Ansatz, für Turboverdichter formuliert, verwendet.

$$P_L \text{ [W/m}^3_{\text{BB}}] = 4,5 * (ET + H_r)^{0,83} * q_{\text{LN}} \quad \frac{q_{\text{LN}} \dots \text{ [m}^3_{\text{N}}/\text{m}^3/\text{h}]}{ET \text{ und } H_r \dots \text{ [m]}} \quad \text{Gleichung 6-13}$$

Dieser Ansatz gilt für Turboverdichter und Wassertiefen bis etwa 20 m. Er entspricht dem Erfahrungswert für den Energieaufwand von Strömungsverdichtern von ca. 3,5Wh/m<sub>N</sub><sup>3</sup>/m<sub>ET</sub>. Den prinzipiellen Unterschied der Verdichtung mit Drehkolbenverdichtern und Strömungsverdichtern hat WESTPHAL (1995) dargestellt.

Mit der Summe der Leistungen aus Gleichung 6-12 und Gleichung 6-13 ist die Leistungsaufnahme des Belüftungssystems festgelegt.

Trifft man nun Annahmen für die Sauerstoffzufuhr, die Luftmenge und die Wassertiefe kann die Leistung des Treibwasserstrahles und die Leistung des Luftverdichters berechnet werden. Dividiert man die angenommene Sauerstoffzufuhr OC<sub>10</sub> durch die Summe der Leistungen erhält man den Sauerstoffertrag des Düsenbelüftungssystems.

Die mit praxisnahen Annahmen für die Sauerstoffzufuhr, für die Luftmenge und die Wassertiefe, berechneten Werte sind in den Abbildungen 6-33 und 6-34 dargestellt.

Man erkennt, daß

- die Wassertiefe einen erheblichen Einfluß auf den Sauerstoffertrag hat und der maximal erreichbare Sauerstoffertrag nur von der Wassertiefe abhängt
- das Optimum liegt für H=12m und einer Sauerstoffzufuhr von 300 [g/m<sup>3</sup>/h] bei einer Luftmenge von ca. 2,1 m<sup>3</sup><sub>N</sub>/m<sup>3</sup>/h und beträgt ca. 2,7 kg/kWh.
- bei größer werdender Sauerstoffzufuhr verändert sich der Sauerstoffertrag, in Abhängigkeit der Luftmenge langsamer (wichtig für das Betriebsverhalten)
- bei kleinen Luftmengen wird die im Gas enthaltene Sauerstoffmenge limitierend

○ mit steigender Luftmenge kann für die gleiche Sauerstoffzufuhr mit geringerer Treibwassermenge gearbeitet werden. Dadurch sinkt aber die Leistung die für die Zerteilung der Luft zur Verfügung steht.

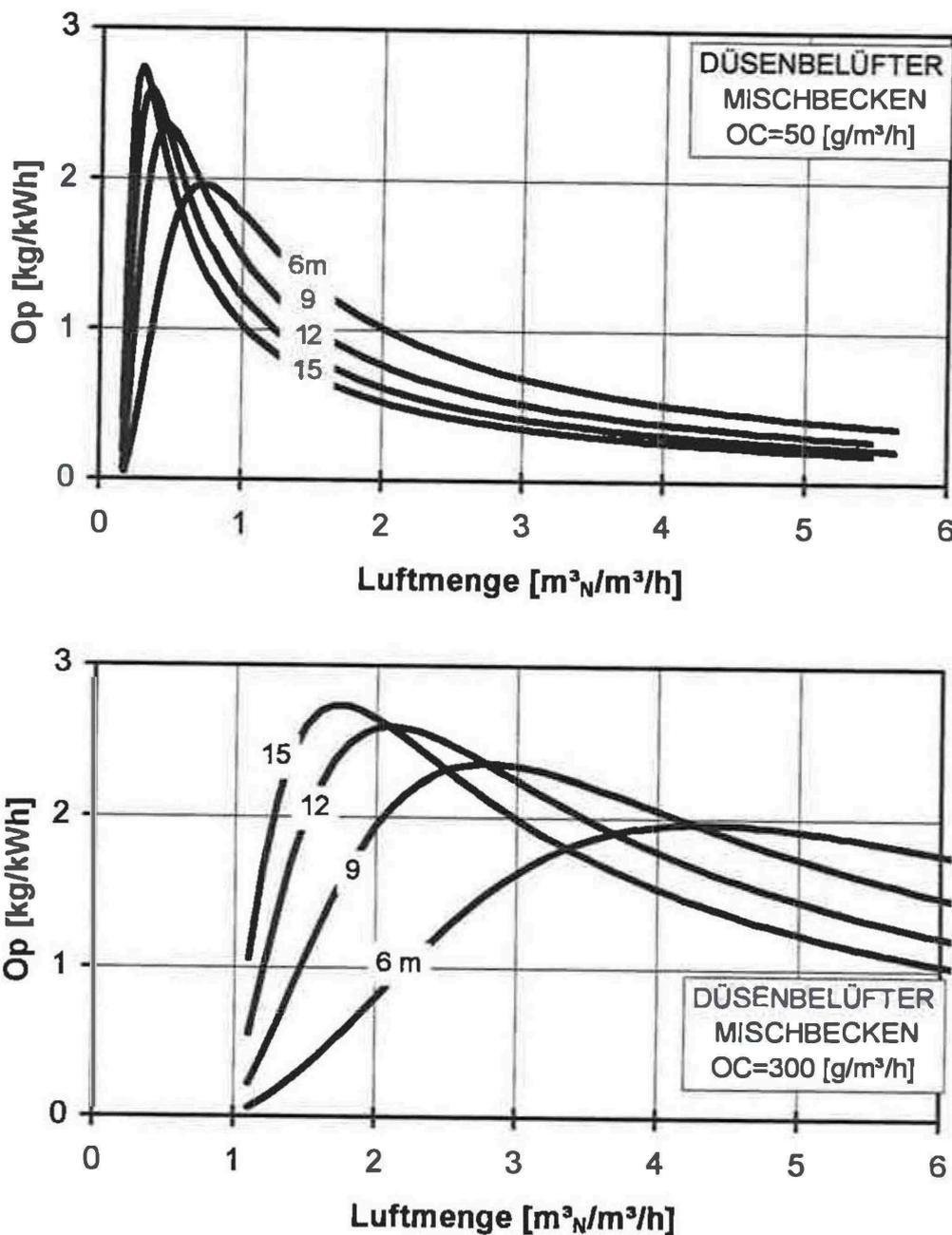
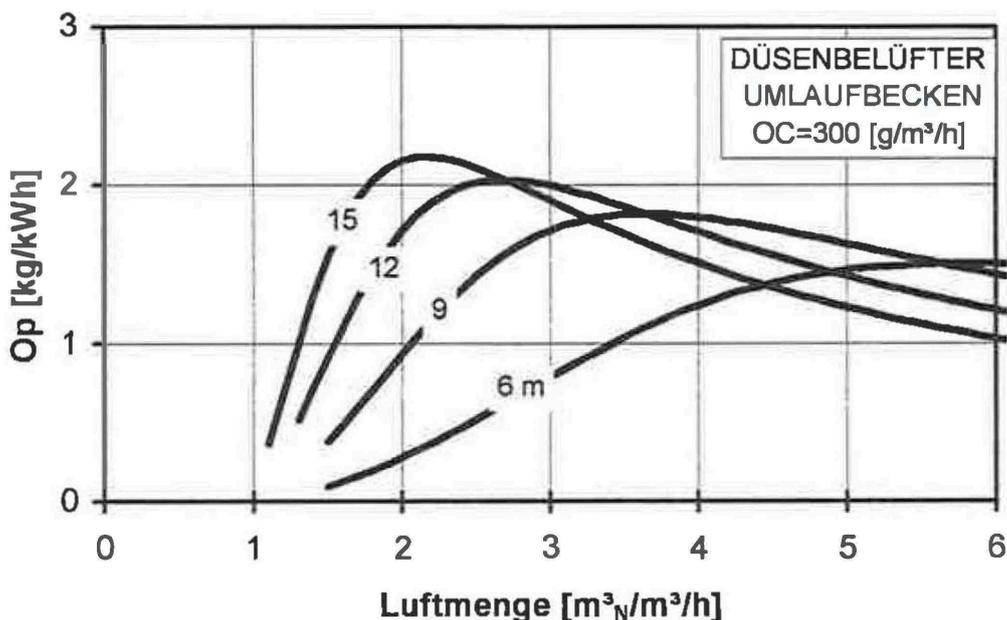


Abbildung 6-33: Sauerstoffertrag  $Op$  in Abhängigkeit der Luftmenge  $q_{LN}$  für Düsenbelüfter in Mischbecken

Die gleichen Auswertungen wurden für Umlaufbecken durchgeführt. Wie schon aus der Abbildung 6-32 ersichtlich ist, liegen die Werte für Umlaufbecken unter jenen für Mischbecken



**Abbildung 6-34: Sauerstoffertrag  $Op$  in Abhängigkeit der Luftmenge  $q_{LN}$  für Düsenbelüfter in Umlaufbecken**

Die Wirtschaftlichkeit im Betrieb hängt von der Charakteristik des Systemes ab. Dazu ist festzuhalten, daß auf einer bestehenden Anlage die Wassertiefe eine Konstante darstellt. Auch die Treibwasserleistung ist in der Regel nicht veränderbar. Die einzige Variable, zur Anpassung der Sauerstoffzufuhr an den jeweiligen Sauerstoffverbrauch, ist die Luftmenge.

Es wird daher die Gleichung 6-12 so umgestellt, daß mit konstanter Treibwasserleistung die erforderliche Luftmenge für eine geforderte Sauerstoffzufuhr berechnet werden kann. Man erkennt sofort, daß die Gleichung 6-14 wieder nur iterativ aufzulösen ist, da die Luftmenge  $q$  in die Konzentrationsdifferenz eingeht.

$$q_{ET} = P_W * \left( \frac{a * H * \Delta c_{lop} * q_{ET/2}}{OC_{10}} \right)^{1/b} * \frac{1}{A * B} \quad \text{Gleichung 6-14}$$

$$\text{mit } A = \rho(vg)^{2/3} \text{ und } B = \left( \frac{v^2}{g} \right)^{1/3b}$$

Die nachstehenden Abbildungen zeigen das Betriebsverhalten. Je flacher der Kurvenzug über der erforderlichen Sauerstoffzufuhr verläuft desto Wirtschaftlicher ist das System im laufenden Betrieb (günstiges Teillastverhalten).

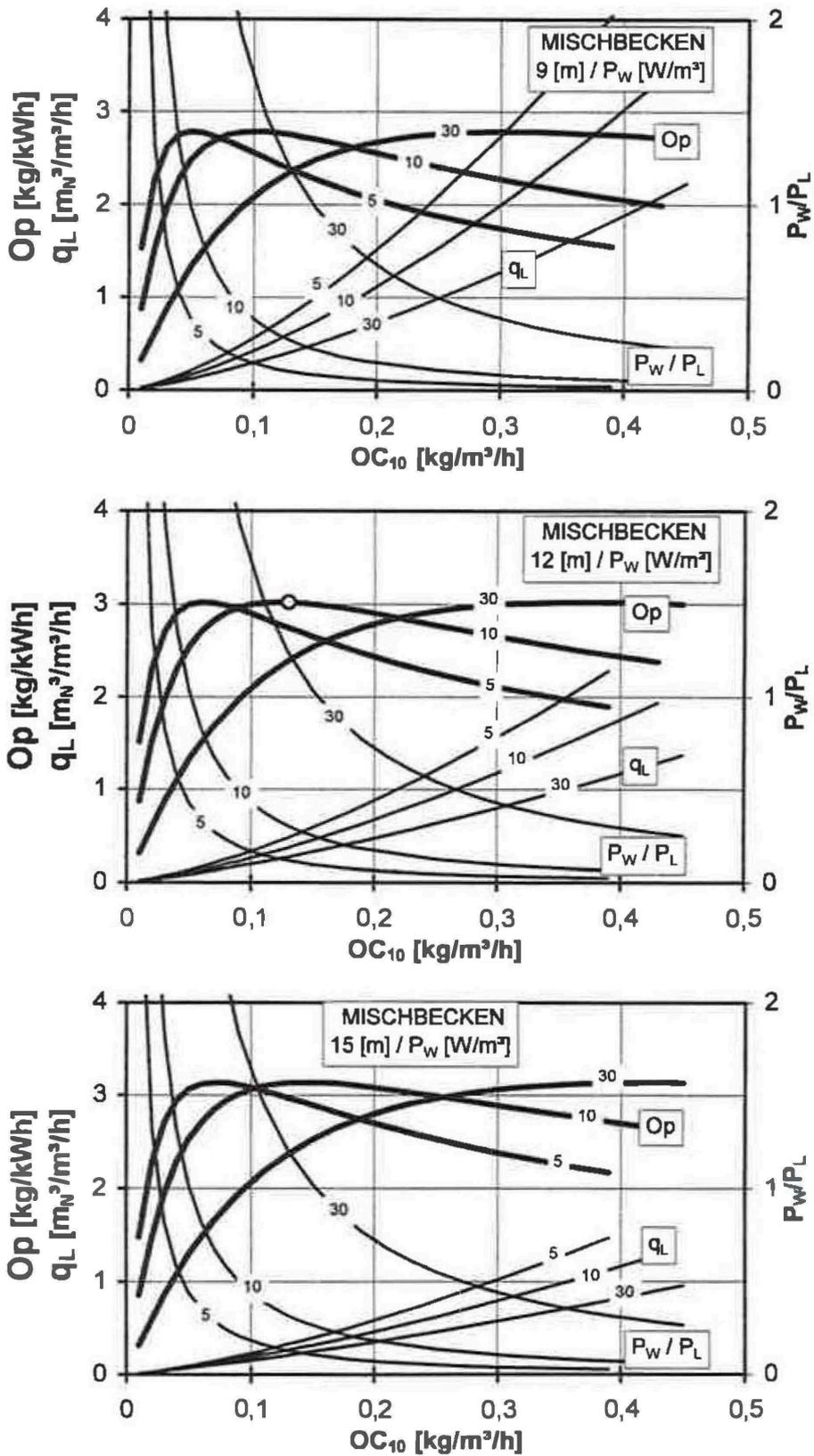


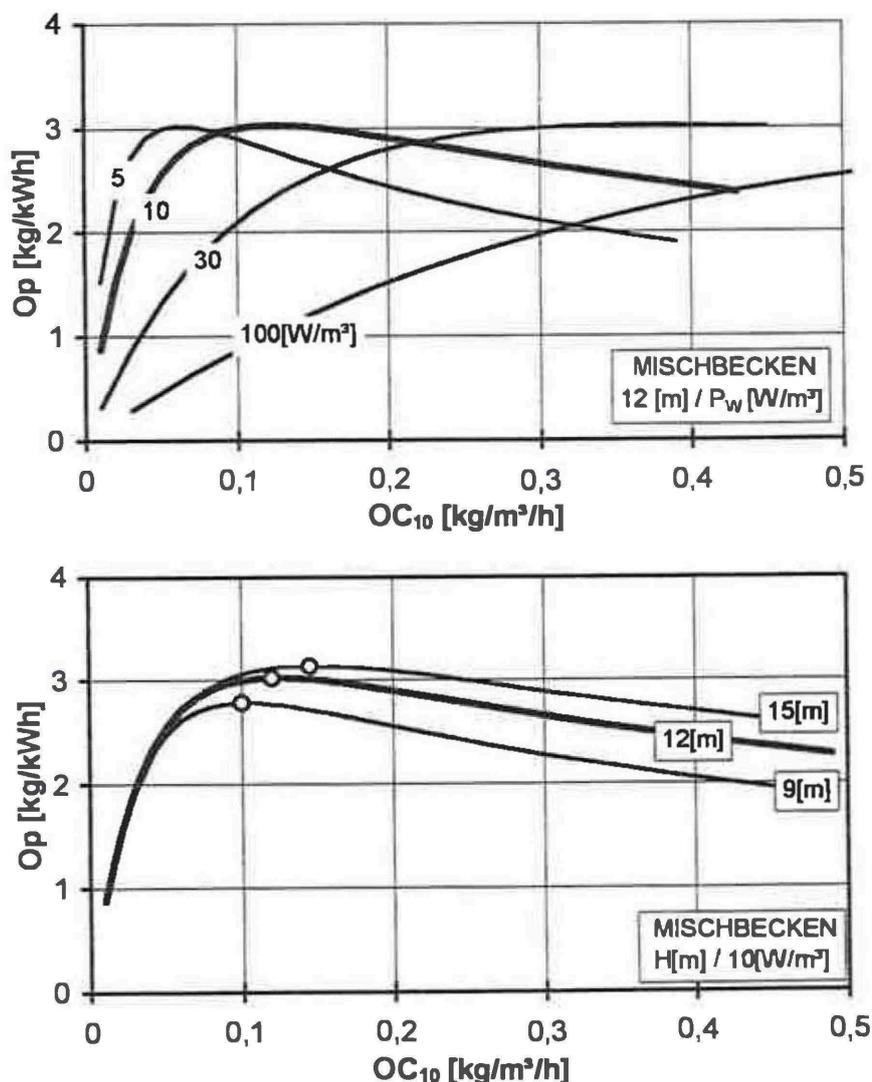
Abbildung 6-35: Sauerstofftrag  $Op$ , Luftmenge  $q_{LN}$  und Leistungsverhältnis  $P_w/P_L$  in Abhängigkeit der Sauerstoffzufuhr für 9 m, 12 m und 15 m Wassertiefe in Mischbecken

Die mit diesen Parametern berechneten Sauerstoffzufuhr-Charakteristiken sind in Abbildung 6-35 für Mischbecken, mit folgende Annahmen, zusammengestellt.

- Treibwasserleistung  $P_W$  : 5 / 10 / 30 [W/m<sup>3</sup><sub>BB</sub>] ; (Zahlen in den Kurven!)
- Wassertiefe:  $H = 9 / 12 / 15$  [m]

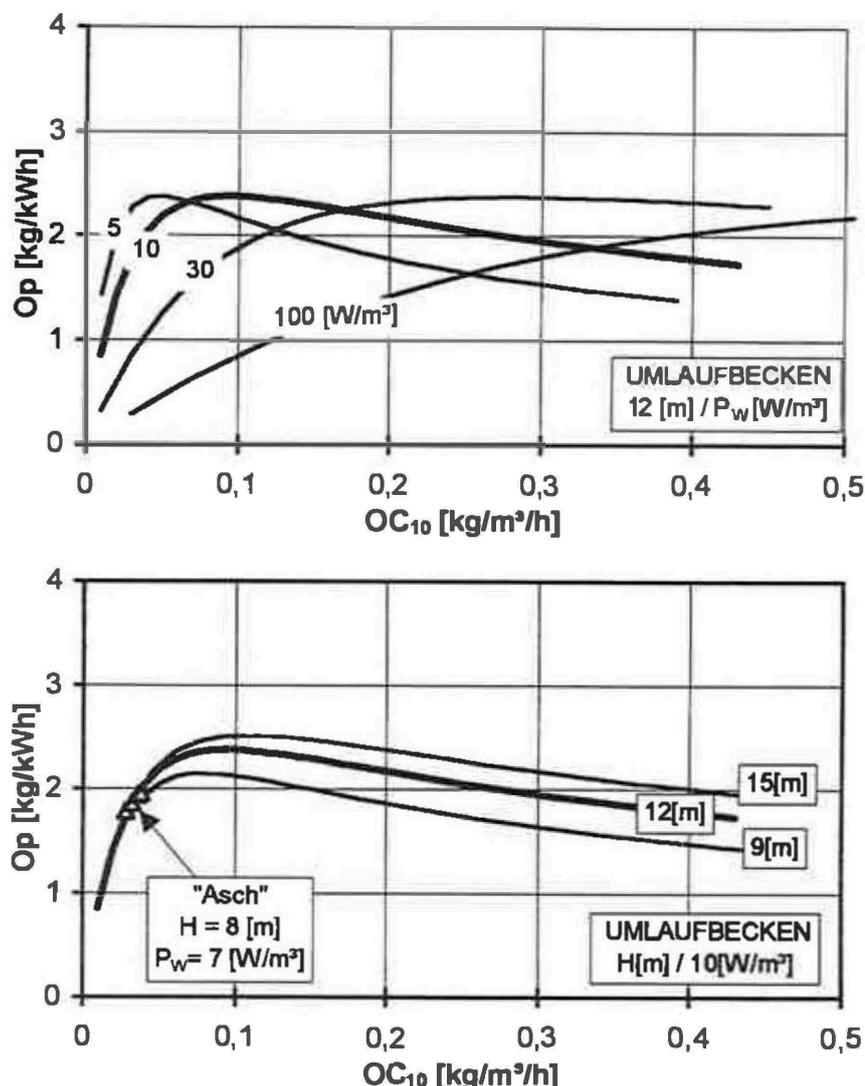
Aus den Verhältnissen der Treibwasserleistung zur Verdichterleistung ist ersichtlich, daß der Leistungsbedarf des Treibwassers mit sinkender Luftmenge sehr stark ansteigt. Je geringer die Wassertiefe wird um so langsamer verläuft dieser Vorgang. Die untersuchten Anlagen sind mit  $P_W/P_L$  Verhältnissen von 0,2-2,0 realisiert.

In der Abbildung 6-36 ist die Abhängigkeit des Sauerstoffertrages von der Treibwasserleistung und der Wassertiefe veranschaulicht.



**Abbildung 6-36: Sauerstoffertrag  $O_p$  in Abhängigkeit der Sauerstoffzufuhr  $OC$  für unterschiedliche Wassertiefe und Treibwasserleistung für Düsenbelüfter in Mischbecken**

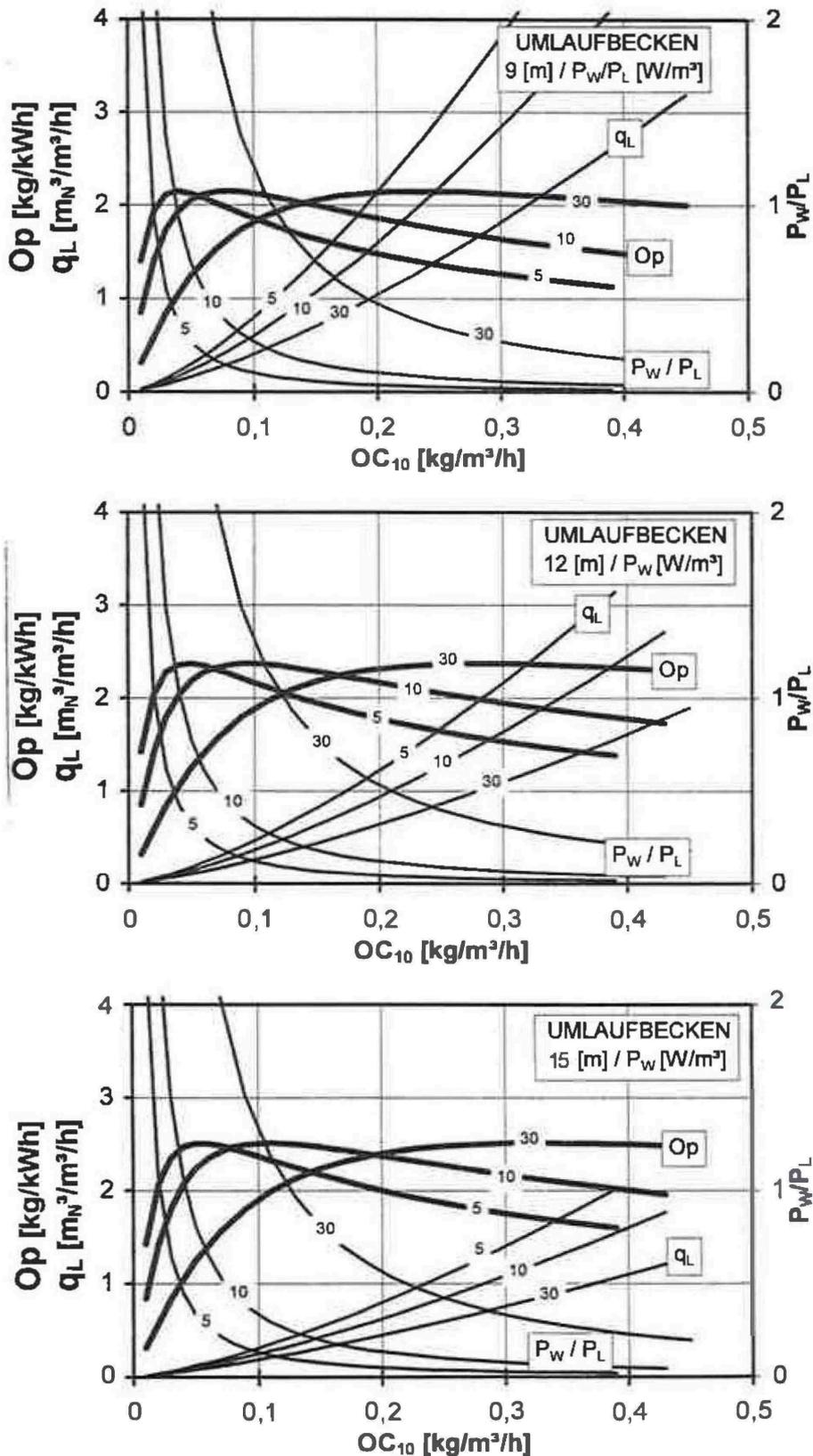
Eine analoge Auswertung wurden für Umlaufbecken durchgeführt. Die Resultate sind in Abbildung 6-37 dargestellt.



**Abbildung 6-37: Sauerstofftrag  $Op$  in Abhängigkeit der Sauerstoffzufuhr  $OC$  für unterschiedliche Wassertiefe und Treibwasserleistung für Düsenbelüfter in Umlaufbecken**

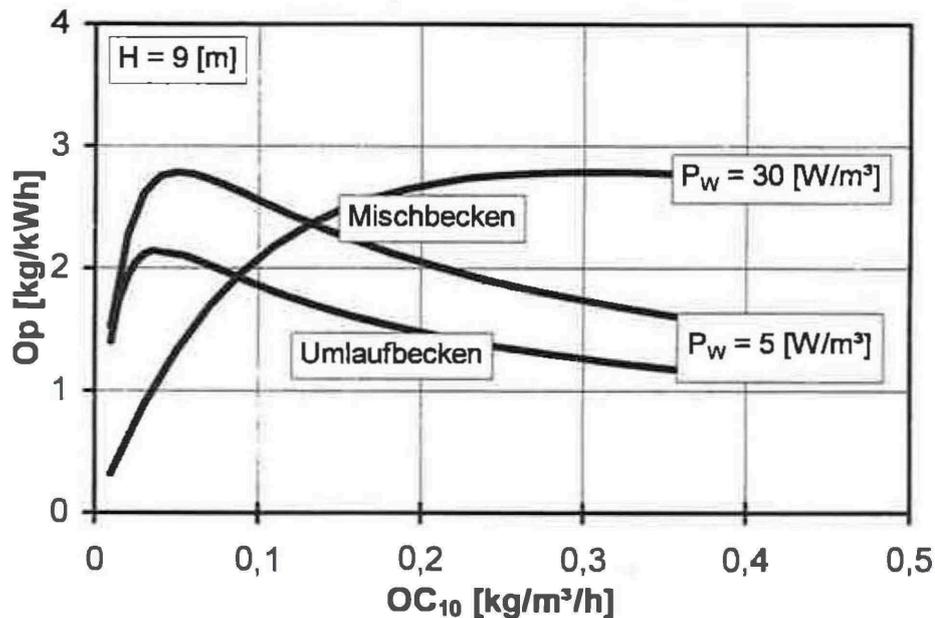
Im unteren Teil der Abbildung 6-37 sind zum Vergleich die Meßwerte der Anlage „Asch“ eingetragen. Man erkennt die gute Übereinstimmung. Auffällig ist die ungünstige Lage der Betriebspunkte auf der steil abfallenden linken Flanke der Sauerstoffzufuhr-Charakteristik. Über die Auslegung von Düsenbelüftungssystemen wird noch ausführlich diskutiert.

Aus der Gleichung 6-11 für Umlaufbecken erhält man mit den gleichen Parametern wie für Mischbecken die Sauerstoffzufuhr-Charakteristiken (Abbildung 6-38).



**Abbildung 6-38: Sauerstofftrag  $Op$ , Luftmenge  $q_{LN}$  und Leistungsverhältnis  $P_w/P_L$  in Abhängigkeit der Sauerstoffzufuhr für 9 m, 12 m und 15 m Wassertiefe in Umlaufbecken**

Die Abbildung 6-39 zeigt die Abhängigkeiten von der Beckenausführung und der Treibwasserleistung am Beispiel einer Wassertiefe von 9 m.



**Abbildung 6-39: Sauerstofftrag  $Op$  in Abhängigkeit der Treibwasserleistung  $P_w$  für 9 m Wassertiefe für Düsenbelüfter in Misch- und Umlaufbecken**

Aus der Abbildung 6-38 kann man folgenden Sachverhalt erkennen:

- der maximal erreichbare Sauerstofftrag wird von der Wassertiefe bestimmt.
- die Treibwasserleistung bestimmt die Sauerstoffzufuhr-Charakteristik. Je kleiner die Treibwasserleistung gewählt wird desto ausgeprägter ist der maximale Sauerstofftrag und desto schlechter wird das Regelverhalten
- der maximal erreichbare Sauerstofftrag liegt bei Mischbecken ca. 20% höher als bei Umlaufbecken.

Abschließend ist festzustellen, daß die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Anlagen mit Düsenbelüfter, geringere Sauerstoffträge als feinblasige Druckbelüftungssysteme mit Gaszerteilern (REINWASSER) hatten.

Die Sauerstoffzufuhr-Charakteristik der Düsenbelüfter unterscheidet sich maßgeblich von jener der Gaszerteiler. Durch das Maximum des Sauerstofftrages ist die richtige Systemauslegung schwieriger als bei den Gaszerteilern. Hierbei kommt es auf die richtige Wahl des Auslegungspunktes an. Wird ein Düsenbelüftungssystem unter der Bemessungs-Sauerstoffzufuhr betrieben und liegt der Auslegungspunkt im Maximum so kommt es zu einem Rückgang des erreichbaren Sauerstofftrages. Der Abfall des Sauerstofftrages ist um so größer je kleiner die Treibwasserleistung gewählt wurde.

## **7. ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION**

Zur Ermittlung von Abhängigkeiten des Sauerstofftrages von den Gaszerteilereinflüssen wurden Sauerstoffzufuhrmessungen auf großtechnisch realisierten Kläranlagen in Reinwasser und in Belebtschlamm durchgeführt. Durch Formulierung der Versuchsergebnisse mit dimensionslosen Kennzahlen wurden Zusammenhänge der Sorptionskennzahl und der Gasbelastung bzw. der Gasdispergierkennzahl ermittelt. Aus diesen Korrelationen wurden schließlich Sauerstoffzufuhr-Charakteristiken für Gaszerteiler und Düsenbelüfter in Reinwasser berechnet. Aus diesen Zusammenhängen zwischen dem Sauerstofftrag und der Sauerstoffzufuhr wurden Hinweise zur Auslegung und den Betrieb von Belüftungssystemen formuliert.

Für die Umsetzung der Versuchsergebnisse in die Sorptionskennzahl und die Gasdispergierkennzahl waren einige grundlegende Fragen zu klären. Aufgrund der Abhängigkeit des Sauerstoffsättigungswertes von der Wassertiefe und der Belüftungszeit (bei Batch-Versuchen) war zu prüfen ob die mit der festgelegten „abwassertechnischen Berechnungsmethode“ ATV (1995) ermittelte Sauerstoffzufuhr direkt verwendbar ist oder ob und in welcher Form Korrekturen anzubringen sind. Auf der Basis der Arbeit von KAYSER (1967) konnte gezeigt werden, daß die mit der „abwassertechnischen Methode“ berechnete Sauerstoffzufuhr unter Standardbedingungen nicht nur „vernachlässigbare Unterschiede“ zu einer exakteren Berechnung aufweist sondern einen algebraisch identen Wert liefert.

### **7.1 Gaszerteiler in Reinwasser**

Die untersuchten Gaszerteiler gliedern sich in drei Typen. Die Platten-, Teller- und Rohrbelüfter wurden unter folgenden Randbedingungen untersucht:

**Tabelle 7-1: Einsatzbedingungen Gaszerteiler**

	Gasbelastung	Gasgeschwindigkeit	Belegungsdichte	Wassertiefe
	m/h	m/h	-	m
Plattenbelüfter	2 - 25	0,5-10	0,3 - 0,7	3 - 6
Tellerbelüfter	8 - 200	0,4 - 15	0,03 - 0,12	3 - 9
Rohrbelüfter	15 - 100	12 - 60	0,15 - 0,3 (1,3!)	3 - 7

Hier fällt sofort auf, daß bei Tellerbelüftern die Gasbelastung deutlich größer als bei den Plattenbelüftern ist.

Zur Beschreibung ihrer Leistungsfähigkeit wurde aus den Meßdaten eine Korrelation für die Sorptionskennzahl in Abhängigkeit der Gasbelastung ermittelt. Die Korrelation hat die Form

$$Y = 10^{-5} * (a - b * \ln \frac{q_{LN} * H}{BD}) \quad \text{Gleichung 7-1}$$

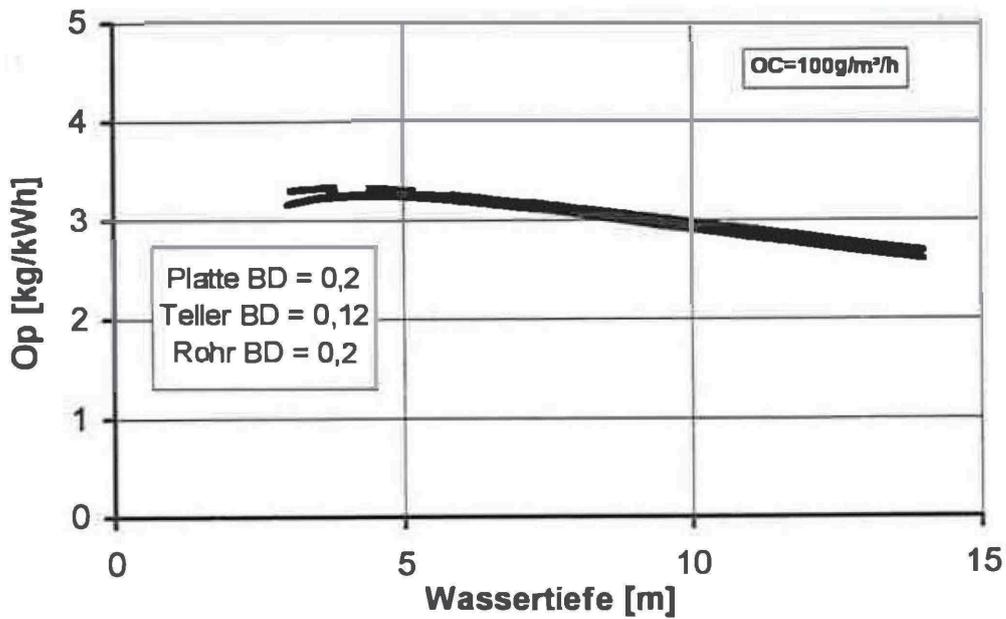
**Tabelle 7-2: Korrelations - Beiwerte**

	a	b	r <sup>2</sup>
Plattenbelüfter	17,65	2,28	0,724
Tellerbelüfter	17,39	1,96	0,926
Rohrbelüfter	14,33	1,25	0,845

Daraus wurden Sauerstoffzufuhr-Charakteristiken berechnet. Aufgrund der Ähnlichkeit der Korrelationen ergeben sich im Allgemeinen ähnliche Aussagen für alle drei Gaszerteilertypen.

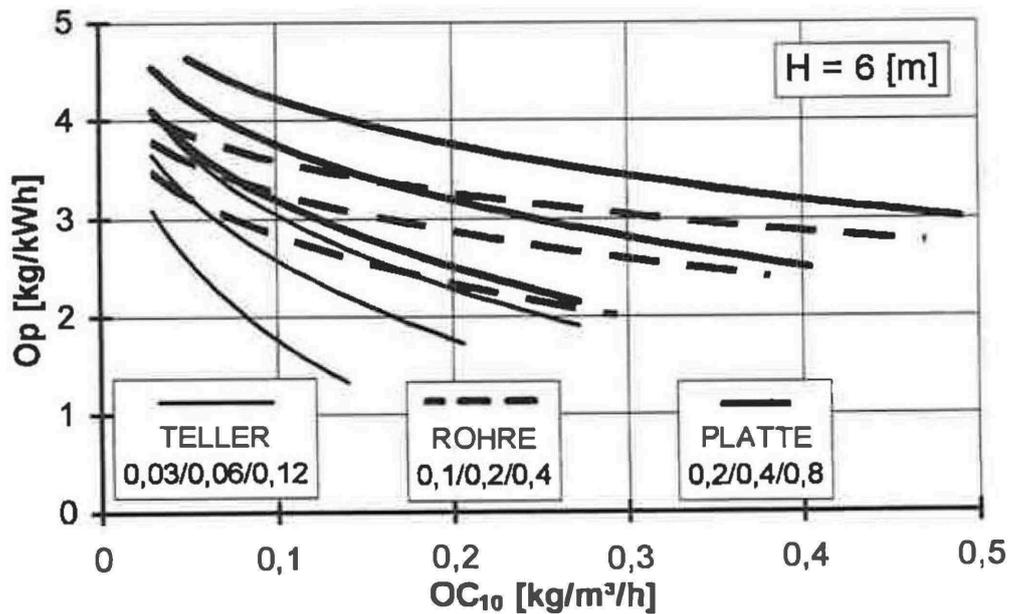
- Eine wesentliche Erkenntnis aus den Auswertungen ist, daß mit steigender Wassertiefe der Sauerstofftrag sinkt.
- Der Sauerstofftrag nimmt mit steigender Belegungsdichte zu.
- Mit sinkender Belegungsdichte oder steigender Sauerstoffzufuhr (und damit steigender Gasbelastung) wird die Veränderung des Sauerstofftrages bei steigender Wassertiefe geringer (die Kurven werden flacher).
- Die Wassertiefe hat vergleichsweise geringen Einfluß.
- Bei allen Typen ergibt sich, in Abhängigkeit der Sauerstoffzufuhr und der Belegungsdichte, eine Wassertiefe bei der ein maximaler Sauerstofftrag auftritt. Dieser liegt bei den Plattenbelüftern bei etwa 3-4 m, bei den Tellerbelüftern bei 4-7 m und bei den Rohrbelüftern bei 4-6 m.
- Eine größere Wassertiefe kann, unter der Forderung Sauerstoffeintrag  $OC = \text{konstant}$  und Sauerstofftrag  $Op = \text{konstant}$ , durch eine Erhöhung der Belegungsdichte, in gewissen Grenzen, kompensiert werden.
- Die Belegungsdichte  $BD$  und die Sauerstoffzufuhr  $OC$  sind austauschbar.

Trägt man die Abhängigkeiten der drei Typen für die gleiche Sauerstoffzufuhr für die Belegungsdichte Plattenbelüfter und Rohrbelüfter  $BD=0,2$  sowie Tellerbelüfter  $BD=0,12$  in die Abbildung 7-1 ein erhält man praktisch drei gleiche Kurven.



**Abbildung 7-1: Sauerstofftrag  $O_p$  in Abhängigkeit der Wassertiefe für Plattenbelüfter, Tellerbelüfter und Rohrbelüfter**

In der Abbildung 7-2 sind die Sauerstoffzufuhr-Charakteristiken für die untersuchten Gaszerteilertypen eingetragen. Die Belegungsdichte steigt jeweils von unten nach oben.



**Abbildung 7-2: Sauerstofftrag  $O_p$  in Abhängigkeit der Sauerstoffzufuhr  $OC$  für Plattenbelüfter, Tellerbelüfter und Rohrbelüfter**

Bei einer Sauerstoffzufuhr von  $0,1 \text{ kg/m}^3/\text{h}$  ist, bei entsprechender Wahl der Belegungsichte und 6 m Wassertiefe, mit allen Typen ein Sauerstofftrag in Reinwasser von mindestens  $3 \text{ kg/kWh}$  erreichbar.

Der größte Sauerstofftrag ist mit Plattenbelüftern erreichbar. Der Sauerstofftrag der Platten- und Tellerbelüfter sinkt bei kleiner Sauerstoffzufuhr rascher ab als bei Rohrbelüftern. Die Sauerstoffzufuhr-Charakteristik der Rohrbelüfter verläuft am flachsten (günstiges Teillastverhalten).

Für eine gegebene Sauerstoffzufuhr ist aus obiger Sauerstoffzufuhr-Charakteristik jene Belegungsichte (bei einer Wassertiefe von 6 m) ablesbar die den gleichen Sauerstofftrag, für die verschiedenen Gaszerteilertypen, erwarten läßt. So ist z.B. für eine Sauerstoffzufuhr von  $0,1 \text{ kg/m}^3/\text{h}$  und Wassertiefe 6 m, bei

- Plattenbelüftern eine Belegungsichte  $BD=0,2$
- Tellerbelüftern eine Belegungsichte  $BD=0,12$  und
- Rohrbelüftern eine Belegungsichte  $BD=0,2$  erforderlich.

Auf dieser Basis ist es nun möglich die Kosten der Installation zu vergleichen. Mit Tellerbelüftern ist eine geringere Belegungsichte als mit Plattenbelüftern oder Rohrbelüftern erforderlich. Daraus ist abzuleiten, daß Tellerbelüfter bei einer größeren Gasbelastung noch die gleiche Sauerstoffausnutzung erreichen. Die Luftmenge beträgt in diesem Beispiel ca.  $0,9 \text{ m}^3/\text{m}^3/\text{h}$ . Die Gasbelastung für die Platten- und die Rohrbelüfter ist also  $27 \text{ m}^3/\text{h}$  und bei den Tellerbelüftern  $27 \times (0,2/0,12) = 45 \text{ m}^3/\text{h}$ . Das Beispiel zeigt, daß Tellerbelüfter bei einer um ca. 70% größeren Gasbelastung die gleiche Sauerstoffzufuhrleistung besitzen. Häufig wird bei Ausschreibungen von Belüftungseinrichtungen die gleiche Gasbelastung der Gaszerteiler verlangt. Diese Forderung ist nach den obigen Erkenntnissen nicht allgemein aufrecht zu erhalten.

Aus den Sauerstoffzufuhr-Charakteristiken ist ein weiterer wichtiger Punkt über die Formulierung von Garantien ableitbar. Die geforderte Sauerstoffzufuhr beruht auf Bemessungsannahmen (Bemessen wird in der Regel auf den 85%-Wert). Es wird also jedenfalls zu fordern sein, daß das Belüftungssystem diese maximale Sauerstoffzufuhr leisten kann. Es ist aber wenig sinnvoll auch den Wirtschaftlichkeitsnachweis, den Sauerstofftrag, bei der selben hohen Sauerstoffzufuhr zu verlangen. Besser ist es, für die am häufigsten tatsächlich notwendige Sauerstoffzufuhr (in Abhängigkeit der Belastung der Kläranlage z.B. für den 60%-Wert) die Sauerstofftrags-Garantie zu fordern. Daraus resultiert in der Regel die Forderung nach einer feinen Abstufungsmöglichkeiten bei der Druckluftherzeugung. Nur dadurch ist gewährleistet, daß im häufigsten Lastfall ein günstiger Sauer-

stofffertrag erreicht wird (siehe auch Kapitel 4.2.2). Andernfalls kann es sein, daß Maschinen in ungünstigen Betriebspunkten laufen oder eine Anpassung überhaupt nicht vorgenommen werden kann. In jedem Fall ist eine Energieverschwendung die Folge. Noch ungünstiger wird die Situation, wenn durch zu geringe Flexibilität des Belüftungssystemes der Reinigungsprozeß nicht in der gewünschten Form ablaufen kann. Hier ist die Problematik der Nitrifikation-Denitrifikation anzusprechen. Bei der Denitrifikation müssen Bereiche (zeitlich oder räumlich versetzt) existieren wo kein Sauerstoff in gelöster Form im Abwasser-Belebtschlamm-Gemisch vorhanden ist. Gelingt es nicht solche Bereiche zu schaffen ist die Leistungsfähigkeit der Stickstoffelimination beeinträchtigt. Im ungünstigsten Fall wird das Reinigungsziel nicht erreicht, weil das Belüftungssystem falsch ausgelegt ist.

Wie die Auswertungen gezeigt haben ist die Gasbelastung ein entscheidender Parameter für den erreichbaren Sauerstofffertrag. Mit der Belegungsichte und der Gasbelastung ist es möglich die Einsatzbedingungen der Gaszerteiler besser zu beschreiben als das früher mit den Angaben „Luftmenge pro Stück“ und „Stück pro m<sup>2</sup>“ der Fall war. Mit der Definition der Belegungsichte wird die Quantität der Gaszerteiler im Becken beschrieben über die „Qualität einer Belüfteraufteilung“ gibt sie jedoch keine Auskunft. Die Frage: „Welche Anordnung ist noch als flächig anzusprechen?“ kann mit der Belegungsichte nicht beantwortet werden. Hier ist nach weiteren, die Strömungsbildung im Becken, charakterisierenden Parametern zu suchen (z.B. „Gleichverteilungsfaktor“). Die Strömung wird auch von der Montagegeometrie der Gaszerteiler am Beckenboden beeinflusst. Plattenbelüfter die unmittelbar am Beckenboden montiert sind, bedingen ein anderes Strömungsprofil als Tellerbelüfter oder Rohrbelüfter die 40cm über dem Beckenboden angeordnet sind. Der Versuch die Strömungsverhältnisse im Belebungsbecken mit dem Verhältnis abgasende Fläche zu Umfang des Gaszerteilers und/oder dem „Gleichverteilungsfaktor“ zu charakterisieren, brachte nicht das gewünschte Ergebnis. Bei den vorliegenden Meßdaten konnten keine eindeutigen Abhängigkeiten gefunden werden.

Auch werden Einflüsse der Beckenausbildung (Breite:Länge:Tiefe-Verhältnis, strömungsgünstige Eckenausbildung, Einbauten, etc.) derzeit nicht erfaßt. Das hier Abhängigkeiten gegeben sind, zeigen die zum Teil nicht erklärbaren Resultate in Umlaufbecken. Die Theorie, daß die überlagerte horizontale Strömung der maßgebliche Faktor für die hohe Sauerstoffzufuhr ist, konnte in der vorliegenden Arbeit in einem Fall bestätigt werden. Eine quantitative Beschreibung der Verhältnisse kann zur Zeit nicht formuliert werden.

## 7.2 Gaszerteiler in Belebtschlamm

Die Anzahl der durchgeführten Messungen in Belebtschlamm ist geringer als jene in Reinwasser. Außerdem sind die Streuungen deutlich größer. Es ist daher nicht gelungen eine Korrelation der Sorptionskennzahl mit der Gasbelastung, getrennt nach Gaszerteilertypen, zu ermitteln. Es wurde aber eine untere Grenze der Sorptionskennzahl abgeschätzt. Mit der Beziehung für die Untergrenze wurde eine Sauerstoffzufuhr-Charakteristik als „Minimalvariante“ erstellt. Die daraus abgelesenen Werte sind Minimalwerte und sollten in der Praxis nicht unterschritten werden. Im Einzelfall können und sollen die tatsächlichen Sauerstofferträge auch deutlich größer sein.

Für den laufenden Anlagenbetrieb sind die Verhältnisse in Belebtschlamm maßgeblich. In der Regel tritt in Belebtschlamm eine Abminderung der Sauerstoffzufuhr auf. Diese wird mit dem  $\alpha$ -Wert (Grenzflächenfaktor) beschrieben. Mit den Sorptionskennzahlen in Reinwasser und in Belebtschlamm (Untergrenze) wurde ein Quotient entsprechend dem Grenzflächenfaktor ( $\alpha$ ) gebildet. Diese Berechnung liefert unabhängig von der Gasbelastung einen Wert von 0,65. Auf bestehenden Kläranlagen werden bei feinblasigen Druckbelüftungssystemen mit Gaszerteilern sehr häufig  $\alpha$ -Werte zwischen 0,6 und 0,7 gefunden, womit die Bildung des  $\alpha'$ -Wertes mit den Sorptionskennzahlen gerechtfertigt erscheint.

Da angenommen werden kann, daß die Sauerstoffzufuhr-Charakteristik für Gaszerteiler auch unter Betriebsbedingungen erhalten bleibt (abgemindert mit dem Grenzflächenfaktor) ist auch ersichtlich warum auf „neuen Anlagen“ der Sauerstoffertrag häufig die Erwartungen übertrifft. Neue Anlagen, die in der Regel unterbelastet sind (es kommt praktisch nie die Bemessungsfracht zur Anlage, und es tritt daher anfänglich der Bemessungs-Sauerstoffverbrauch nicht auf), werden bei einer geringeren Sauerstoffzufuhr bzw. mit einer geringeren Gasbelastung betrieben als für die sie ausgelegt wurden. Bei geringerer Sauerstoffzufuhr bzw. einer geringeren Gasbelastung tritt aber ein größerer Sauerstoffertrag auf. Voraussetzung dafür ist, daß die Verdichter ausreichend an den geringeren Luftbedarf angepaßt werden können (siehe Kapitel 4.2.2).

Im Belebungsbecken einer biologischen Kläranlage ist in der Regel ein Sauerstoffgehalt von 1-2g/m<sup>3</sup> vorhanden. Auch Abwassertemperaturen von 15-20°C sind in den Sommermonaten möglich. In beiden Fällen wird die Konzentrationsdifferenz verringert. Für gleichbleibende Sauerstoffzufuhr ist daher der Luftvolumenstrom zu vergrößern. Damit ist bei konstanter Sauerstoffzufuhr die erforderliche Leistung größer, die Folge ist ein sinkender Sauerstoffertrag.

### 7.3 Düsenbelüfter in Reinwasser

Von den fünf untersuchten Anlagen waren zwei Anlagen als Umlaufbecken und drei Anlagen als Mischbecken ausgeführt. Die Düsen auf allen Anlagen waren von gleicher Bauart. Die vorliegenden Daten erlauben eine getrennte Auswertung von Misch- und Umlaufbecken. Man ermittelt folgende Korrelation:

$$Y = a * X^b \qquad \text{Gleichung 7-2}$$

**Tabelle 7-3: Koeffizienten zur Berechnung der Sorptionskennzahl von Düsenbelüftern**

	a	b	r <sup>2</sup>
Mischbecken	1,30*10 <sup>-6</sup>	0,345	0,897
Umlaufbecken	1,33*10 <sup>-6</sup>	0,325	0,799

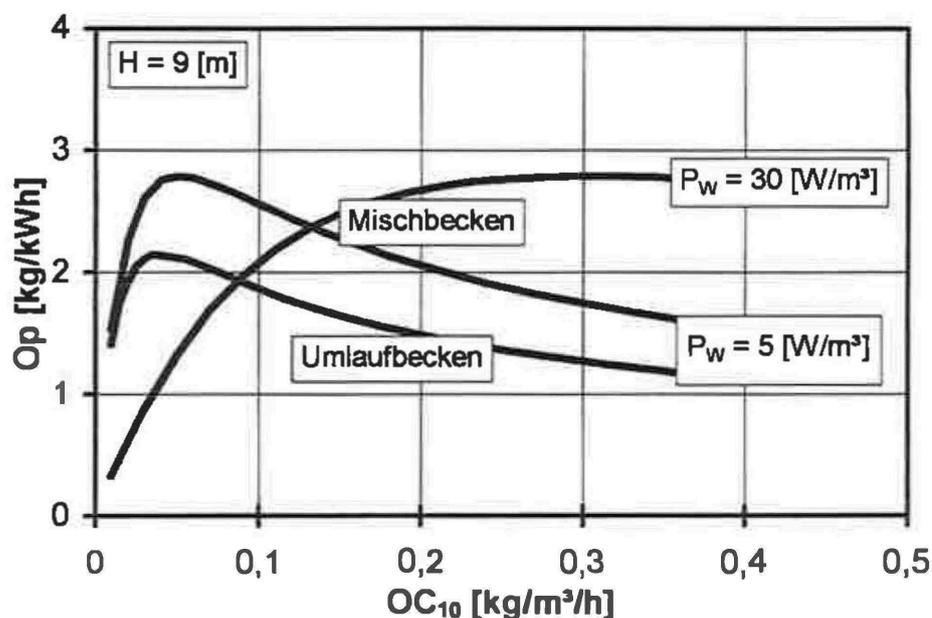
Es wurde die Sorptionskennzahl berechnet und gegen die Gasdispersionzahl aufgetragen. Der maximal erreichbare Sauerstofftrag liegt bei Mischbecken um ca. 20% höher als bei Umlaufbecken.

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Düsenbelüfter hatten, geringere Sauerstoffträge als feinblasige Druckbelüftungssysteme mit Gaszerteilern (REINWASSER).

Beim Vergleich mit den Gaszerteilern fällt sofort die andere Form der Sauerstoffzufuhr-Charakteristik auf. Während sie bei den Gaszerteilern eine konkav abfallende Kurve darstellt ist sie bei den Düsenbelüftern mit einem Maximum behaftet.

Dadurch ist die richtige Systemauslegung noch schwieriger als bei den Gaszerteilern. Die Sauerstoffzufuhr-Charakteristik steigt zunächst mit steigender Luftmenge und sinkender Treibwassermenge. In diesem Bereich ist die Sauerstoffzufuhr durch die Sauerstofffracht des eintretenden Luftstromes begrenzt. Nach dem Durchlaufen des maximalen Sauerstofftrages beginnt der Sauerstofftrag mit weiter steigender Luftmenge wieder zu sinken. Die Geschwindigkeit der Abnahme links und rechts des Maximalwertes ist für die Wirtschaftlichkeit im laufenden Betrieb verantwortlich. Problematisch ist die linke Flanke der Sauerstoffzufuhr-Charakteristik. Wird das System auf die maximale Sauerstoffzufuhr ausgelegt, so kommt es bei einer geringeren Sauerstoffzufuhr (bei geringerem Sauerstoffbedarf der Mikroorganismen) zu einem Rückgang der Wirtschaftlichkeit. Der Abfall des Sauerstofftrages ist um so dramatischer je kleiner die Treibwasserpumpe (P<sub>w</sub>) ausgelegt wurde (siehe Abbildung 7-3).

Die Unterschiede der Beckengeometrie sowie die Abhängigkeit des Sauerstofftrages von der Treibwasserleistung sind in Abbildung 7-3 zusammengefaßt.



**Abbildung 7-3: Sauerstoffertrag OP in Abhängigkeit der Sauerstoffzufuhr OC für Düsenbelüfter in Misch- und Umlaufbecken**

Die schon im Kapitel 7.1 getroffenen Feststellungen zur Auslegung sind hier genauso gültig. Aus dem Verlauf der Sauerstoffzufuhr-Charakteristik ist also abzuleiten, daß der richtige Auslegungspunkt für das System jedenfalls rechts vom Maximum des Sauerstoffertrages liegen sollte. Je kleiner die Treibwasserleistung gewählt wird um so weiter rechts sollte der Auslegungspunkt liegen.

Eine wirtschaftliche Auslegung von Düsenbelüftern gelingt nur bei möglichst gleichmäßigem und hohem Sauerstoffbedarf wie er in der Regel bei Industrieabwasserbehandlungsanlagen auftritt. Für stark schwankende Bedingungen wie sie auf kommunalen Abwasserreinigungsanlagen vorherrschen ist eine optimale Auslegung praktisch nicht möglich.



## 8. LITERATUR

- ALBERTSON O., DIGREGORIO D. (1975): Biologically mediated inconsistencies in aeration equipment performance, J. Water Pollut. Control Fed., Vol. 47, No.5
- ASCE (1992): Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water. ASCE Standard; American Society of Civil Eng., New York
- ASCE (1993): Standard Guidelines for in-process oxygen transfer testing, American Society of Civil Eng., New York
- ASCE (1984): A Standard for the Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water. Published by the American Society of Civil Engineers.
- ATV (1995): Merkblatt M209, Messung der Sauerstoffzufuhr von Belüftungseinrichtungen in Belebungsanlagen in Reinwasser und in belebtem Schlamm (im Druck)
- ATV (1979): ATV-Arbeitsanleitung für die Bestimmung der Sauerstoffzufuhr in Reinwasser, Korr. Abwasser , 26, H.8
- ATV (1985): Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik, Band IV, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn
- BAEHR H.D., STEPHAN K. (1994): Wärme- und Stoffübertragung, Springer Verlag
- BENNETT G., KEMPE L. (1965): Oxygen Transfer in Biological Systems, 20th Prude Conference
- BURDE M. (1986): Batch-Versuche zur Bestimmung des Sauerstoffübertragungsfaktors  $\alpha$ , unveröffentlichte Diplomarbeit, TU Braunschweig
- DECKWER W.-D., BURCKHART R., ZOLL G. (1974): Chem. Eng. Sci. 29, 2177
- DECKWER W.-D. (1985): Reaktionstechnik in Blasensäulen, Verlag Salle+Sauerländer

- DOWNING A.L., BOON A.G. (1963): Oxygen transfer in the activated sludge process, III Manhattan College Conference (1960), Advances in biological waste treatment, W.W.Eckenfelder & Mc Cabe
- ELSTNER F. (1978): Untersuchungen zum Stoffübergang von Sauerstoff aus Luft in wässrigen Lösungen, Diss., Dortmund
- EMDE v. d. W. (1968): Belüftungssysteme und Beckenformen, Münchner Beiträge, Bd.5
- EMDE v. d. W. (1979): Criteria for selecting aeration systems. Prog.Wat.Tech., 11, 3, 201-204.
- EMDE v. d. W. (1980): Untersuchungen über Energieeinsparungen beim Belebungsverfahren, Berichte aus Wassergütwirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, TU München, Nr.28, S.253-276
- GRAAF van der J.H.J.M. (1979): The combination of diffused air aeration and horizontal flow, Progress in Water Technology, Vol.11, No.3, 139-149
- HALLENSLEBEN J. (1980): Simultaner Stoffaustausch von CO<sub>2</sub> und Sauerstoff an Einzelblasen und in Blasenschwärmen, Diss., Hannover
- HANEL R. (1982): Der Sauerstoffeintrag und seine Messung beim Belebungsverfahren unter besonderer Beachtung der Viskosität und Oberflächenspannung, Schriftenreihe WAR Darmstadt, Bd.13
- HUIBREGTSE G.L., ROONEY T.C., RASMUSSEN D.C. (1983): Factors affecting fine bubble diffused aeration, JWPCF, Vol.55, No.8, 1057-1064
- KAYSER R. (1991): Voraussetzungen für die Durchführbarkeit von Sauerstoffeintragsmessungen im Betrieb; Veröff.Inst.f. Stadtbauwesen, TU Braunschweig, Heft 50
- KAYSER R. (1995): mündliche Mitteilung
- KAYSER R. (1967): Ermittlung der Sauerstoffzufuhr von Abwasserbelüftern unter Betriebsbedingungen. Veröffentlichung des Institutes für Stadtbauwesen, Technische Hochschule Braunschweig

- KAYSER R. (1977): Zur Frage der Überprüfung des Sauerstoffeintrages, 12. ÖWWV Seminar, Raach , Wiener Mitteilungen Band 22
- KAYSER R. (1982): Wirtschaftlichkeit verschiedener Belüftungssysteme unter Betriebsbedingungen, 17. ÖWWV Seminar, Wiener Mitteilungen, Band 47
- KAYSER R. (1986): Möglichkeiten und Grenzen der Bestimmung der Sauerstoffzufuhr in Reinwasser und unter Betriebsbedingungen, Wiener Mitteilungen Bd.64
- KESSENER H. J.M.H., RIBBIUS F. J. (1934): Comparison of Aeration Systems for the Activated Sludge Process, Sewage Works Journal, 6, 423-443
- KESSENER H.J.M.H., RIBBIUS F.J. (1932): Practical Activated Sludge Research, Institute of Sewage Purification Journal and Proceedings, Vol.1
- LEWIS W.K., WHITEMAN W.G. (1924): Principles of gas absorption, Ind.Engng.Cem. 16, 12, 1215-20
- LISTER A.R., BOON A.G. (1973): Aeration in Deep Tanks: An Evaluation of a Fine-Bubble Diffused-Air System, Wat. Pollut.Control, 590-605
- MORGAN P.F., BEWTRA J.K. (1960): Air diffuser efficiencies, JWPCF, Vol.32, No.10, 1047-1059
- MUELLER J.S., STENSEL H.D. (1990): Biologically oxygen transfer in the activated sludge process, JWPCF, Vol 62, No.2, 193-203
- ÖNORM (1979): ÖNORM M5888: Sauerstoffzufuhr-Leistung von Belüftungseinrichtungen - Bestimmung in Reinwasser
- PASVEER A., SWEERIS S. (1968): Über die Theorie des Sauerstoffeintrages und des Sauerstoffverbrauches beim Belebtschlammverfahren nach dem Stand der Kenntnisse von 1967, Münchner Beiträge Bd.5, 1968, 115-140
- PASVEER A. (1955): Untersuchungen über das Belebtschlammverfahren für die Reinigung von Abwasser, Der Gesundheits-Ingenieur 76, Heft 21/22, 332-340

- PÖPEL H.J., WAGNER M. (1991): Grundlegende Einflußfaktoren zur Optimierung von Druckbelüftungssystemen, 1. Gem. Wassertechnisches Seminar, WAR Band 54, Darmstadt
- PÖPEL H.J., WAGNER M. (1994): Theorie und Praxis von Sauerstoffeintrag und -ertrag in tiefen Belebungsbecken, 5. Hannoversche Industrieabwassertagung, Heft 87, 111-131
- REIBER S., STENSEL D. (1985): Biologically enhanced oxygen transfer in a fixed-film system, JWPCF Vol.57, 2/85, 135-142
- REID R.C., PRAUSNITZ J.M., SHERWOOD T.K. (1977): The properties of gases and liquids, Mc Graw Hill, New York
- RIEGLER G., CAPITAIN P. (1989): Zusätzliche Umwälzung bei geringer Belüftungsdichte und Denitrifikation, Schriftenreihe WAR der TH Darmstadt, Band 37
- RISSLER S., HAHN T. (1995): Effect of horizontal flow on aeration, Scientific Impeller, Flygt Firmenschrift, No.3
- SCHMIT F.L., WREN J.D., REDMON D.T. (1978): The effect of tank dimensions and diffuser placement on oxygen transfer, JWPCF Vol.50, 7/78, 1750-1767
- TERRY D.W., THIEM L.T.: (1989): Potential interferences in catalysis of the unsteady-state reaeration technique, JWPCF, Vol.61, No.8, 1464-1470
- VERHAAGEN J. (1979): Measurement of oxygenation capacity in different aeration systems, Progress in Water Technology, Vol.11, No.3, 151-159
- WAGNER M. (1986): Vergleich von Meßmethoden und Auswerteverfahren zur Bestimmung des Sauerstoffzufuhrvermögens, WAR Band 25, Darmstadt
- WAGNER M. (1991): Einfluß oberflächenaktiver Substanzen auf Stoffaustauschmechanismen und Sauerstoffeintrag, Dissertation, WAR Band 53, Darmstadt

- WESTPHAL G. (1995): Leistungseintrag in Belebungsbecken Eine grundlegende Darstellung, KA, Nr.8, 1353-1358
- ZLOKARNIK M. (1978): Sorption Characteristics for Gas-Liquid Contacting in Mixing Vessels, Advances in Biochemical Engineering 8, 133-151
- ZLOKARNIK M. (1979): Sorption characteristics of slot injectors and their dependency on coalescence behaviour of the system, Chemical Engineering Science, Vol.34, 1265-1271
- ZLOKARNIK M. (1980a): Eignung und Leistungsfähigkeit von Oberflächenbelüftern für biologische Abwasserreinigungsanlagen, Korresp.Abwasser 27, 1/80, 14-21
- ZLOKARNIK M. (1980b): Eignung und Leistungsfähigkeit von Volumenbelüftern für biologische Abwasserreinigungsanlagen, Korresp.Abwasser 27, 3/80, 194-209
- ZLOKARNIK M. (1980c): Koaleszenzphänomene im System gasförmig/flüssig und deren Einfluß auf den O<sub>2</sub>-Eintrag bei der biologischen Abwasserreinigung, Korresp.Abwasser 27, 728-734

## 9. ANHANG

## 9.1 Gaszerteiler in Reinwasser

GASZERTEILER REINWASSER									
Anlage	VBB	WT	Q	OC*	ABB	Abel	Anteil	Umfang	A/U
	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[Nm <sup>2</sup> /h]	[kg/h]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[%]	[m]	[m <sup>2</sup> /m]
Göss	1320	8.6	1360	165.0	154	10.7	6.9	226	0.047
Judb	710	3.11	1764	91.0	243	28.5	11.7	759	0.038
Judb	710	3.11	2718	137.0	243	28.5	11.7	759	0.038
Judb	710	3.11	3516	163.0	243	28.5	11.7	759	0.038
Blud	3974	4.5	3600	352.0	440	31.8	7.2	788	0.040
Blud	3974	4.5	5700	549.0	440	31.8	7.2	788	0.040
Blud	3974	4.5	4700	455.0	440	31.8	7.2	788	0.040
Blud	3974	4.5	2600	275.0	440	31.8	7.2	788	0.040
Trum	705	4.85	2630	218.0	144	41.5	28.8	170	0.244
Trum	705	4.85	1670	148.0	144	41.5	28.8	170	0.244
Trum	705	4.85	4240	340.0	144	41.5	28.8	170	0.244
Leop	180	2.9	1085	66.0	54	69	127.8	1178	0.059
Leop	180	2.9	2926	163.5	54	69	127.8	1178	0.059
Leop	180	2.9	1744	106.0	54	69	127.8	1178	0.059
Leop	180	2.9	1315	80.0	54	69	127.8	1178	0.059
Leop	180	2.9	3104	173.5	54	69	127.8	1178	0.059
Leop	180	2.9	1936	117.0	54	69	127.8	1178	0.059
Immu	340	3.8	620	37.0	89	3.2	3.6	49.6	0.065
WrNe	1267	4	3220	235.0	288	126	43.8	324	0.389
Wr.Neu	1267	4	1610	125.0	288	126	43.8	324	0.389
Purg	488	3.94	657	70.6	124	80	64.5	224	0.357
Purg	488	3.94	335	37.5	124	80	64.5	224	0.357
Sa56	968	4.25	1467	116.5	237	80	33.8	200	0.400
Sa56	968	4.25	446	50.0	237	80	33.8	200	0.400
Sa14	900	3.15	1488	123.0	286	144	50.3	360	0.400
Sa14	900	3.15	114	19.0	286	144	50.3	360	0.400
StMi	550	4.5	750	78.0	122	48	39.3	128	0.375
StMi	550	4.5	375	36.6	122	48	39.3	128	0.375
Unke	2047	5.4	2866	288.0	380	150	39.5	360	0.417
L320	408	5	1392	91.0	82	8.14	9.9	180	0.045
L320	408	5	964	51.5	82	8.14	9.9	180	0.045
L180	408	5	783	76.7	82	4.6	5.6	102	0.045
L180	408	5	543	40.3	82	4.6	5.6	102	0.045
Num	1487	6.56	1873	199.4	227.5	41.5	18.2	387	0.107
Num	1487	6.56	2728	301.0	227.5	41.5	18.2	387	0.107
Nurn	1487	6.56	2541	285.7	227.5	41.5	18.2	387	0.107
Bamb	1751	4.85	3651	392.0	361	79	21.9	377	0.210
Bamb	1751	4.85	1216	144.0	361	79	21.9	377	0.210
Wmes	296	3.3	601.5	46.6	94	64	68.1	150	0.427
Wmes	296	3.3	122.5	10.8	94	64	68.1	150	0.427
Wmes	296	3.3	435.5	36.7	94	64	68.1	150	0.427
Wmes	296	3.3	258	23.0	94	64	68.1	150	0.427
W420	647	4.25	1313	89.9	152	10.45	6.9	235	0.044
W420	647	4.25	243	21.3	152	10.45	6.9	235	0.044
W420	647	4.25	576	45.8	152	10.45	6.9	235	0.044
W420	647	4.25	88	9.3	152	10.45	6.9	235	0.044
W312	1333	4.25	977	59.9	313.6	7.76	2.5	174	0.045
W312	1333	4.25	213	18.5	313.6	7.76	2.5	174	0.045
W312	1333	4.25	417	32.0	313.6	7.76	2.5	174	0.045
W312	1333	4.25	1709	97.7	313.6	7.76	2.5	174	0.045
W312	1333	4.25	117	11.5	313.6	7.76	2.5	174	0.045
Verh	64	4	85.8	5.5	16	1.25	7.8	33.9	0.037
Verh	64	4	110	9.4	16	1.25	7.8	33.9	0.037
Verh	64	4	144.6	10.9	16	1.25	7.8	33.9	0.037
Verh	64	4	202.9	14.6	16	1.25	7.8	33.9	0.037
Verh	64	4	245.1	16.7	16	1.25	7.8	33.9	0.037

GASZERTEILER REINWASSER						
Anlage	vg	vb	Y	PBB	qL	qL ET/2
	[m/h]	[m³/m²/h]	[-]	[W/m³]	[Nm³/m²/h]	[m³/m²/h]
Göss	6.6	127.1	7.69E-05	17.1	1.0	0.8
Judb	6.5	61.9	8.72E-05	15.7	2.5	2.2
Judb	10.0	95.4	8.49E-05	24.2	3.8	3.4
Judb	12.9	123.4	7.78E-05	31.3	5.0	4.4
Blud	6.9	113.2	1.19E-04	8.3	0.9	0.8
Blud	11.0	179.2	1.20E-04	13.2	1.4	1.2
Blud	9.0	147.8	1.20E-04	10.9	1.2	1.0
Blud	5.0	81.8	1.33E-04	6.0	0.7	0.6
Trum	15.7	63.4	8.87E-05	38.1	3.7	3.2
Trum	10.0	40.2	9.53E-05	24.2	2.4	2.0
Trum	25.4	102.2	8.53E-05	61.5	6.0	5.2
Leop	18.7	15.7	1.07E-04	36.7	6.0	5.6
Leop	50.6	42.4	9.62E-05	99.1	16.3	15.2
Leop	30.2	25.3	1.06E-04	59.2	9.7	9.1
Leop	22.7	19.1	1.07E-04	44.5	7.3	6.8
Leop	53.7	45.0	9.63E-05	105.1	17.2	16.1
Leop	33.5	28.1	1.06E-04	65.7	10.8	10.1
Immu	6.2	193.8	7.87E-05	14.7	1.8	1.6
WrNe	9.9	25.6	9.83E-05	21.5	2.5	2.3
Wr.Neu	5.0	12.8	1.03E-04	10.8	1.3	1.1
Purg	4.8	8.2	1.42E-04	11.3	1.3	1.2
Purg	2.4	4.2	1.55E-04	5.8	0.7	0.6
Sa56	5.4	18.3	1.02E-04	13.5	1.5	1.3
Sa56	1.6	5.6	1.51E-04	4.1	0.5	0.4
Sa14	4.7	10.3	1.40E-04	10.8	1.7	1.5
Sa14	0.4	0.8	3.26E-04	0.8	0.1	0.1
StMi	5.3	15.6	1.28E-04	12.8	1.4	1.2
StMi	2.6	7.8	1.18E-04	6.4	0.7	0.6
Unke	6.3	19.1	9.92E-05	15.7	1.4	1.2
L320	14.2	171.0	6.84E-05	34.9	3.4	2.9
L320	9.8	118.4	8.24E-05	24.2	2.4	2.0
L180	8.0	170.2	7.14E-05	19.7	1.9	1.6
L180	5.5	118.0	7.88E-05	13.6	1.3	1.1
Num	6.6	45.1	8.97E-05	16.5	1.3	1.0
Num	9.5	65.7	9.35E-05	24.1	1.8	1.5
Num	8.9	61.2	9.56E-05	22.4	1.7	1.4
Bamb	8.6	46.2	1.23E-04	21.0	2.1	1.8
Bamb	2.9	15.4	1.38E-04	7.0	0.7	0.6
Wmes	5.8	9.4	1.23E-04	13.9	2.0	1.8
Wmes	1.2	1.9	1.43E-04	2.8	0.4	0.4
Wmes	4.2	6.8	1.35E-04	10.1	1.5	1.3
Wmes	2.5	4.0	1.44E-04	6.0	0.9	0.8
W420	7.7	125.6	9.47E-05	18.4	2.0	1.8
W420	1.4	23.3	1.09E-04	3.4	0.4	0.3
W420	3.4	55.1	9.74E-05	8.1	0.9	0.8
W420	0.5	8.4	1.35E-04	1.2	0.1	0.1
W312	2.8	125.9	7.32E-05	6.6	0.7	0.7
W312	0.6	27.4	1.08E-04	1.4	0.2	0.1
W312	1.2	53.7	9.37E-05	2.8	0.3	0.3
W312	4.9	220.2	6.76E-05	11.7	1.3	1.1
W312	0.3	15.1	1.24E-04	0.8	0.1	0.1
Verh	4.8	68.6	6.89E-05	11.3	1.3	1.2
Verh	6.1	88.0	7.13E-05	14.5	1.7	1.5
Verh	8.0	115.7	7.02E-05	19.1	2.3	2.0
Verh	11.2	162.3	6.98E-05	26.7	3.2	2.8
Verh	13.6	196.1	6.94E-05	32.3	3.8	3.4

GASZERTEILER REINWASSER						
Anlage	kLa10	kLa wahr	Cs wahr t=0	Cs[kg/m <sup>3</sup> ]	log cs t=0	x <sup>m</sup>
	[h <sup>-1</sup> ]	[h <sup>-1</sup> ]	[g/m <sup>3</sup> ]	[g/m <sup>3</sup> ]	[g/m <sup>3</sup> ]	[mol/mol]
Göss	7.9	9.2	13.6	15.8	12.5	0.1251
Judb	10.0	10.8	11.9	12.8	11.9	0.1739
Judb	15.0	16.2	11.9	12.9	11.9	0.1747
Judb	17.9	19.2	12.0	12.8	12.0	0.1775
Blud	6.4	7.4	12.0	13.8	11.4	0.1416
Blud	10.2	11.8	11.8	13.5	11.5	0.1426
Blud	8.4	9.7	11.8	13.6	11.4	0.1422
Blud	5.1	6.0	11.6	13.5	11.2	0.1360
Trum	22.1	24.9	12.4	14.0	11.9	0.1520
Trum	15.0	17.0	12.4	14.0	11.8	0.1480
Trum	34.5	38.6	12.5	14.0	12.0	0.1539
Leop	28.5	31.3	11.7	12.9	11.6	0.1674
Leop	69.9	76.1	11.9	13.0	11.7	0.1709
Leop	45.5	49.9	11.8	13.0	11.6	0.1675
Leop	34.5	37.9	11.7	12.9	11.6	0.1674
Leop	74.3	80.8	11.9	13.0	11.7	0.1709
Leop	50.5	55.3	11.7	12.9	11.6	0.1677
Immu	8.1	8.8	12.4	13.5	12.0	0.1682
WrNe	14.4	16.0	11.6	12.9	11.8	0.1589
Wr.Neu	7.4	8.3	11.8	13.3	11.7	0.1557
Purg	10.4	12.2	11.9	14.0	10.9	0.1348
Purg	5.7	6.7	11.4	13.5	10.8	0.1316
Sa56	9.2	10.3	11.7	13.1	11.8	0.1544
Sa56	3.9	4.7	11.1	13.1	11.0	0.1315
Sa14	10.5	11.9	11.5	13.0	11.2	0.1521
Sa14	1.6	2.1	9.9	13.1	9.1	0.0933
StMi	10.4	12.1	11.7	13.6	11.3	0.1372
StMi	4.9	5.6	11.9	13.7	11.4	0.1417
Unke	9.8	11.3	12.4	14.3	11.7	0.1397
L320	16.0	17.5	12.7	13.9	12.4	0.1642
L320	13.6	14.6	8.6	9.3	12.7	0.1726
L180	9.0	10.3	18.2	21.0	11.6	0.1414
L180	7.1	7.9	12.5	13.9	12.2	0.1580
Num	9.2	10.6	12.7	14.6	12.1	0.1355
Num	13.9	16.1	12.6	14.6	12.0	0.1328
Num	13.2	15.3	12.5	14.6	11.9	0.1313
Bamb	16.3	19.1	11.7	13.7	11.3	0.1348
Bamb	6.0	7.1	11.5	13.7	11.0	0.1271
Wmes	11.9	13.4	11.8	13.2	11.4	0.1558
Wmes	2.8	3.2	11.5	13.2	11.1	0.1483
Wmes	9.4	10.7	11.6	13.2	11.2	0.1510
Wmes	5.9	6.7	11.6	13.3	11.1	0.1476
W420	11.8	13.1	10.6	11.8	12.0	0.1621
W420	2.4	2.8	11.9	13.5	11.6	0.1486
W420	5.2	5.9	12.0	13.5	11.8	0.1543
W420	1.1	1.2	11.6	13.5	11.1	0.1360
W312	3.3	3.6	12.3	13.5	12.2	0.1671
W312	1.0	1.2	11.9	13.5	11.6	0.1492
W312	1.8	2.0	12.1	13.5	11.8	0.1563
W312	5.4	5.9	12.4	13.5	12.3	0.1700
W312	0.6	0.7	11.6	13.4	11.3	0.1412
Verh	5.4	5.9	14.5	15.9	12.0	0.1654
Verh	6.9	7.8	18.8	21.3	11.5	0.1502
Verh	9.0	10.1	16.9	18.8	11.7	0.1572
Verh	12.7	14.1	16.2	18.0	11.8	0.1596
Verh	15.3	16.9	15.4	17.0	11.9	0.1623

## 9.2 Gaszerteiler in Belebtschlamm

GASZERTEILER BELEBTSCHLAMM									
Anlage	VBB	WT	Q	OC*	ABB	Abel	Anteil	Umfang	A/U
	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[Nm <sup>2</sup> /h]	[kg/h]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[%]	[m]	[m <sup>2</sup> /m]
Blu1/3,6%	3974	4.5	3830	192	880	31.8	3.6	788	0.0404
Blu1	3974	4.5	3170	176	880	31.8	3.6	788	0.0404
Blu1	3974	4.5	2460	137	880	31.8	3.6	788	0.0404
Blu1	3974	4.5	5510	214	880	31.8	3.6	788	0.0404
Blu2/1,4%	3974	4.5	3680	142	880	12.3	1.4	306	0.0402
Blu2	3974	4.5	1490	84	880	12.3	1.4	306	0.0402
Blu2	3974	4.5	2950	136	880	12.3	1.4	306	0.0402
Blu2	3974	4.5	730	47	880	12.3	1.4	306	0.0402
Blu2	3974	4.5	2180	114	880	12.3	1.4	306	0.0402
Leop 128%	180	2.9	2950	71	54	69	127.8	1178	0.0586
WrNe 44%	1267	4	1650	90	288	126	43.8	324	0.3889
WrNe	1267	4	3290	184	288	126	43.8	324	0.3889
Purg 65%	488	3.94	671	42.4	124	80	64.5	224	0.3571
Purg	488	3.94	333	23.5	124	80	64.5	224	0.3571
Stmi 39%	550	4.5	750	57.5	122	48	39.3	128	0.3750
Lalt8%	2800	6.1	2590	113	440	35	8.0	365	0.0959
Lalt	2800	6.1	2000	80	440	35	8.0	365	0.0959
Lneu 13%	2800	6.1	3000	214	440	56	12.7	1194	0.0469
Lneu	2800	6.1	4000	276	440	56	12.7	1194	0.0469
Lneu	2800	6.1	4900	332	440	56	12.7	1194	0.0469
Lneu	2800	6.1	1600	120	440	56	12.7	1194	0.0469
L42n 13%	2800	6.1	3000	218	440	28	6.4	1194	0.0235
L23n 13%	2800	6.1	3000	201	440	56	12.7	587	0.0938

GASZERTEILER BELEBTSCHLAMM						
Anlage	vg	vb	Y	PBB	qL	q ET/2
	[m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /h]	[m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /h]		[W/m <sup>2</sup> ]	[m <sup>3</sup> N/m <sup>3</sup> /h]	[m <sup>3</sup> N/m <sup>3</sup> /h]
Blu1/3,6%	3.9	120.4	6.45E-05	9.4	0.96	0.86
Blu1	3.2	99.7	7.22E-05	7.8	0.80	0.71
Blu1	2.5	77.4	7.25E-05	6.0	0.62	0.55
Blu1	5.6	173.3	4.92E-05	13.5	1.39	1.24
Blu2/1,4%	3.7	299.2	4.91E-05	9.0	0.93	0.83
Blu2	1.5	121.1	7.38E-05	3.7	0.37	0.34
Blu2	3.0	239.8	5.90E-05	7.2	0.74	0.67
Blu2	0.7	59.3	8.57E-05	1.8	0.18	0.16
Blu2	2.2	177.2	6.76E-05	5.4	0.55	0.49
Leop 128%	52.4	42.8	4.76E-05	102.7	16.39	15.73
WrNe 44%	5.2	13.1	7.58E-05	11.2	1.30	1.17
WrNe	10.3	26.1	8.00E-05	22.3	2.60	2.34
Purg 65%	4.8	8.4	9.77E-05	11.4	1.38	1.22
Purg	2.4	4.2	1.10E-04	5.7	0.68	0.61
Stmi 39%	5.3	15.6	1.06E-04	12.9	1.36	1.18
Lalt8%	4.9	74.0	4.10E-05	11.8	0.93	0.77
Lalt	3.8	57.1	3.69E-05	9.1	0.71	0.60
Lneu 13%	5.7	53.6	7.05E-05	13.7	1.07	0.90
Lneu	7.7	71.4	6.74E-05	18.3	1.43	1.20
Lneu	9.4	87.5	6.59E-05	22.5	1.75	1.48
Lneu	3.1	28.6	7.36E-05	7.3	0.57	0.48
L42n 13%	5.8	107.1	7.17E-05	13.8	1.07	0.90
L23n 13%	5.8	53.6	6.55E-05	13.8	1.07	0.90

GASZERTEILER BELEBTSCHLAMM						
Anlage	kLa10	kLa w	Cs wahr t=0	Cs[kg/m <sup>3</sup> ]	log cs t=0	x <sup>**</sup>
	[h <sup>-1</sup> ]	[h <sup>-1</sup> ]	[g/m <sup>3</sup> ]	[g/m <sup>3</sup> ]	[g/m <sup>3</sup> ]	[mol/mol]
Blu1/3,6%	3.51	3.76	12.84	13.78	12.55	0.175
Blu1	3.22	3.49	12.71	13.75	12.43	0.171
Blu1	2.51	2.72	12.69	13.74	12.43	0.171
Blu1	3.91	4.13	13.03	13.76	12.81	0.183
Blu2/1,4%	2.61	2.75	12.97	13.69	12.82	0.183
Blu2	1.55	1.68	12.61	13.65	12.41	0.171
Blu2	2.49	2.66	12.86	13.72	12.65	0.178
Blu2	0.87	0.96	12.38	13.57	12.22	0.165
Blu2	2.09	2.25	12.74	13.71	12.50	0.173
Leop 128%	31.48	32.63	12.09	12.53	12.36	0.193
WrNe 44%	4.94	5.34	13.29	14.38	12.22	0.172
WrNe	10.39	11.26	12.90	13.98	12.19	0.171
Purg 65%	6.44	7.06	12.30	13.49	12.00	0.166
Purg	3.56	3.95	12.18	13.51	11.83	0.161
Stmi 39%	7.64	8.53	12.26	13.68	11.94	0.156
Lalt8%	2.74	2.90	13.90	14.72	13.43	0.179
Lalt	1.92	2.02	14.16	14.92	13.52	0.182
Lneu 13%	5.30	5.83	13.11	14.42	12.77	0.160
Lneu	6.79	7.45	13.23	14.51	12.83	0.162
Lneu	8.15	8.93	13.28	14.54	12.86	0.163
Lneu	2.94	3.25	13.18	14.58	12.68	0.158
L42n 13%	5.39	5.94	13.10	14.44	12.74	0.159
L23n 13%	4.96	5.43	13.22	14.46	12.88	0.163

### 9.3 Düsenbelüfter in Reinwasser

DÜSENBELÜFTER REINWASSER								
Anlage	VBB	WT	Q	q	q	OC*	Pw	
	[m³]	[m]	[Nm³/h]	[Nm³/m³/h]	ET/2 [m³/h]	[kg/h]	[W]	
Lenz1	7000	9.4	14300	2.04	10636.8	1914.4	135000	
Lenz1	7000	9.4	12500	1.79	9297.9	1738.4	135000	
Lenz1	7000	9.4	6370	0.91	4738.2	1125.4	135000	
Lenz3	7330	9.3	8350	1.14	6251.4	1058	150000	
Lenz3	7330	9.3	10490	1.43	7853.6	1400	150000	
Lenz4	1940	9.7	6600	3.40	4773.0	845	43000	
Kundl	2450	12	4224	1.72	2804.1	641	30000	
Kundl	2450	12	5750	2.35	3823.8	845	30000	
Kundl	2450	12	11000	4.49	7317.8	1536	30000	
Kundl	2450	12	4000	1.63	2662.9	622	30000	
Asten	11000	7.5	9260	0.84	7222.8	775	99000	
Asten	11000	7.5	7630	0.69	5955.6	571	99000	
Asten	11000	7.5	8430	0.77	6582.4	778	99000	
Aschach	2493	8	700	0.28	534.2	75	12700	
Aschach	2493	8	715	0.29	545.7	81	15600	
Aschach	2493	8	345	0.14	263.3	41	12000	
Aschach	2493	8	840	0.34	641.7	93	15600	
Aschach	2493	8	240	0.10	183.5	32	12000	
Aschach	2493	8	570	0.23	436.2	70	15600	
Aschach	2493	8	620	0.25	472.3	71	15600	
Aschach	2493	8	450	0.18	342.8	48	9300	
Aschach	2493	8	840	0.34	640.4	92	15600	
DÜSENBELÜFTER REINWASSER								
Anlage	X	Y	kLa10	Cs	kLa wahr	Cs wahr t=0	x"	log cs t=0
	[-]	[-]	[h-1]	[g/m³/h]	[h-1]	[g/m³/h]	[mol/mol]	[g/m³/h]
Lenz1	1.09E+05	7.69E-05	16.75	16.3256	19.75	13.8476	0.1163	12.4216
Lenz1	1.25E+05	8.15E-05	15.41	16.1192	18.29	13.5776	0.1126	12.2654
Lenz1	2.45E+05	1.09E-04	9.97	16.1190	12.47	12.8902	0.0863	11.0658
Lenz3	2.06E+05	7.14E-05	8.71	16.5677	10.18	14.1795	0.1213	12.5955
Lenz3	1.64E+05	7.59E-05	11.53	16.5625	13.60	14.0478	0.1166	12.3961
Lenz4	7.77E+04	7.19E-05	26.40	16.4957	30.84	14.1254	0.1204	12.7092
Kundl	9.58E+04	7.43E-05	15.44	16.9425	18.34	14.2643	0.1038	12.8133
Kundl	7.03E+04	7.03E-05	20.04	17.2108	23.66	14.5762	0.1071	12.9702
Kundl	3.67E+04	6.63E-05	36.50	17.1764	42.71	14.6780	0.1123	13.2059
Kundl	1.01E+05	7.47E-05	14.68	17.2921	17.52	14.4911	0.1012	12.6891
Asten	1.13E+05	5.77E-05	4.59	15.3620	5.10	13.8036	0.1514	13.0561
Asten	1.37E+05	5.12E-05	3.40	15.2783	3.74	13.8924	0.1576	13.2833
Asten	1.24E+05	6.47E-05	4.64	15.2591	5.22	13.5521	0.1454	12.8323
Aschach	1.99E+05	7.19E-05	1.93	15.5594	2.22	13.5748	0.1350	12.6388
Aschach	2.39E+05	7.71E-05	2.10	15.4755	2.43	13.3884	0.1307	12.4697
Aschach	3.81E+05	8.16E-05	1.06	15.4510	1.24	13.2650	0.1268	12.3151
Aschach	2.03E+05	7.52E-05	2.42	15.4334	2.78	13.3992	0.1325	12.5407
Aschach	5.46E+05	9.34E-05	0.83	15.4365	0.99	12.9863	0.1167	11.9026
Aschach	2.99E+05	8.50E-05	1.83	15.3753	2.14	13.1274	0.1240	12.2036
Aschach	2.76E+05	7.88E-05	1.85	15.3603	2.15	13.2662	0.1298	12.4356
Aschach	2.27E+05	7.20E-05	1.24	15.4942	1.42	13.5267	0.1353	12.6516
Aschach	2.03E+05	7.43E-05	2.39	15.4596	2.74	13.4439	0.1333	12.5734

# WIENER MITTEILUNGEN

WASSER • ABWASSER • GEWÄSSER

Eine von den Wasserbauinstituten an der Technischen Universität Wien, den Instituten für Wasserwirtschaft der Universität für Bodenkultur und dem Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverband herausgegebene Schriftenreihe

Band Nr		Preis öS
81	<b>ÖWWV-Fortbildungskurs, 1989</b> Biologische Abwasserreinigung (1989)	450,--
82	<b>24. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1989</b> Klärschlamm Entsorgung (1989)	450,--
83	<b>2. Symposium, 1990</b> Viruskontamination der Umwelt und Verfahren der Kontrolle (1990)	250,--
84	<b>ÖWWV-Fortbildungskurs, 1989</b> Schadstofffragen in der Wasserwirtschaft	400,--
85	<b>Frischherz, H.; Benes, E.; Ernst, J.; Haber, F.; Stuckart, W.:</b> Schlußbericht zum Forschungsvorhaben Trinkwasseraufbereitung mit Ultraschall, Projekt Abschnitt I (1989)	250,--
86	<b>Summer, W.:</b> Umfassende Betrachtung der Erosions- und Sedimentationsproblematik (1989)	350,--
87	<b>25. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1990</b> Großräumige Lösungen in der Wasserversorgung (1990)	vergriffen
88	<b>Revitalisierung von Fließgewässern</b> Beiträge zum Workshop Scharfling, 1989 (1990)	460,--
89	<b>Kulturtechnik und Wasserwirtschaft - heute</b> Teil 9 (1990)	250,--

90	<b>Schmid, B.H.:</b> A Study on Kinematic Cascades (1990)	250,--
91	<b>Blöschl, G.:</b> Snowmelt Simulation in rugged Terrain - The Gap between Point and Catchment Scale approaches (1990)	250,--
92	<b>Blaschke, A.P.:</b> Dateninterpretation und ihre Bedeutung für Grundwasserströmungsmodelle (1990)	250,--
93	<b>Fürst, J.:</b> Decision Support Systeme für die Grundwasserwirtschaft unter Verwendung geografischer Informationssysteme (1990)	250,--
94	<b>Frischherz H., Benes E., Hager F., Stuckhart W., Ilmer A., Gröschl M., Bolek W.:</b> Schlußbericht zum Forschungsvorhaben "Trinkwasseraufbereitung mit Ultraschall", Projekt-Abschnitt (1990)	250,--
95	<b>Svardal K.:</b> Anaerobe Abwasserreinigung - Ein Modell zur Berechnung und Darstellung der maßgebenden chemischen Parameter (1991)	300,--
96	<b>ÖWWV-Fortbildungskurs, 1991</b> EDV-Einsatz auf Abwasserreinigungsanlagen (1991)	400,--
97	<b>ÖWWV-Fortbildungskurs, 1991</b> Entfernung von Phosphorverbindungen bei der Abwasserreinigung (1991)	350,--
98	<b>26. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1991</b> Auswirkungen der Wasserrechtsgesetznovelle 1990 auf Behörden, Planer und Betreiber kommunaler Abwasserreinigungsanlagen - aus technischer, rechtlicher und wirtschaftlicher Sicht (1991)	500,--
99	<b>ÖWWV-Fortbildungskurs, 1991</b> Geruchsemissionen aus Abwasseranlagen	300,--
100	<b>ÖWWV-Fortbildungskurs, 1992</b> Anpassung von Kläranlagen an den Stand der Technik	400,--
101	<b>Pelikan, B. (Habilitationsschrift)</b> Umweltbezogene Planung wasserbaulicher Maßnahmen an Fließgewässern	250,--

Band Nr		Preis öS
102	<b>Behr, O.</b> Erfassung hydrometeorologischer Elemente in Österreich im Hinblick auf den Wasserhaushalt	i.V
103	<b>27. ÖWWV-Seminar Ottenstein 1992</b> Wasser- und Abfallwirtschaft in dünn besiedelten Gebieten	500,--
104	<b>Virus Contamination of the Environment</b> Methods and Control	i.V
105	<b>ÖWAV-Fortbildungskurs 1992</b> Fließgewässer und ihre Ökologie	300,--
106	<b>Mader, H.</b> Festlegung einer Dotierwassermenge über Dotationsversuche	300,--
107	<b>Wasserrechtsgesetznovelle 1990 und neue Emissionsverordnungen</b> (Vorträge anlässlich der UTEC 1992)	400,--
108	<b>Chemische Analytik für einen zeitgemäßen Gewässerschutz</b> (Vorträge anlässlich der UTEC 1992)	400,--
109	<b>Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (10).</b> Beiträge zum Seminar an der Universität für Bodenkultur im November 1994	i.V
110	<b>ÖWAV-Seminar Februar 1993</b> Bemessung u. Betrieb von Kläranlagen zur Stickstoffentfernung	500,--
111	<b>28. ÖWAV-Seminar Ottenstein 1993</b> Wasserreserven in Österreich - Schutz und Nutzung in Gegenwart und Zukunft	vergriffen
112	<b>Contamination of the Environment by Viruses and Methods of Control</b>	250,--
113	<b>Wasserkraft</b> O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. S. Radler anlässlich seiner Emeritierung gewidmet	300,--
114	<b>Klärwärter-Grundkurs</b> (2. Auflage 1994)	450,--
115	<b>Urban, W.</b> Beitrag zur Reduzierung der Abwasseremissionen der Bleicherei beim Sulfatverfahren	300,--

116	<b>ÖWAV-Seminar:</b> Eigenüberwachung von Abwasserreinigungsanlagen für den Gewässerschutz	350,--
117	<b>ÖWAV-Seminar:</b> Abwasserreinigungskonzepte - Internationaler Erfahrungsaustausch über neue Entwicklungen	350,--
118	<b>29. ÖWAV-Seminar: Ottenstein 1994</b> 3 Jahre WRG-Novelle	270,--
119	<b>Landeskulturelle Wasserwirtschaft -</b> Festschrift anlässlich der Emeritierung von o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. H. Supersperg	250,--
120	<b>Gewässerbetreuungskonzepte</b> - Stand und Perspektiven	450,--
121	<b>ÖWAV-Seminar:</b> Generelle Entwässerungsplanung im Siedlungsraum	400,--
122	<b>Kupfersberger, H.</b> Bedeutung von geowissenschaftlicher Zusatzinformation für die Schätzung der Transmissivitätsverteilung in einem Aquifer	250,--
123	<b>Holzmann, H.</b> Modellierung und Regionalisierung der Grundwassermengenbildung und des Bodenwasserhaushaltes	300,--
124	<b>ÖWAV-Seminar:</b> Pflanzenkläranlagen - Stand der Technik, Zukunftsaspekte	300,--
125	<b>ÖWAV-Seminar:</b> Abwasserreinigung - Probleme bei der praktischen Umsetzung des Wasserrechtsgesetzes	450,--
126	<b>ÖWAV-Seminar:</b> Konfliktfeld Landwirtschaft - Wasserwirtschaft	400,--
127	<b>ÖWAV-Seminar:</b> Alte und neue Summenparameter	400,--
128	<b>ÖWAV-Symposium:</b> Viruskontamination der Umwelt und Verfahren der Kontrolle	i.V

- |     |  |        |
|-----|--|--------|
| 129 | <b>ÖWAV-Seminar:</b><br>Einfluß von Indirekteinleitungen auf Planung und Betrieb<br>von Abwasseranlagen (1996)<br>ISBN 3-85234-020-9   | 450,-- |
| 130 | <b>31. ÖWAV-Seminar, Ottenstein 1996:</b><br>Zentrale und dezentrale Abwasserreinigung<br>ISBN 3-85234-021-7   | 500,-- |
| 131 | <b>ÖWAV-Seminar:</b><br>Methoden der Planung und Berechnung des Kanalisationssystems (1996)<br>ISBN 3-85234-022-5  | i.V.   |
| 132 | <b>Blöschl. G.</b><br>Scale and Scaling in Hydrology (1996)<br>ISBN 3-85234-023-2  | 500,-- |
| 133 | <b>Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (11)</b><br>Integrale Interpretation eines zeitgemäßen Gewässerschutzes (1996)<br>ISBN 3-85234-024-0   | i.V.   |
| 134 | <b>Frey, W.</b><br>Ein Beitrag zur Charakterisierung von Belüftungssystemen<br>für die biologische Abwasserreinigung nach dem Belebungsverfahren<br>mit Sauerstoffzufuhrmessungen (1996)<br>ISBN 3-85234-025-9 | 300,-- |
| 135 | <b>Nowak, O., 1996</b><br>Nitrifikation im Belebungsverfahren bei maßgebendem Industrieabwassereinfluß<br>ISBN 3-85234-026-7   | 500,-- |

## **Die Bände sind zu beziehen bei:**

Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft  
der Technischen Universität Wien  
Karlsplatz 13/226, A-1040 Wien

Band: 12, 15, 16, 20, 28, 34, 35, 36, 37, 47, 49, 53, 54, 56, 57, 58, 61, 62, 63, 64, 65, 69,  
73, 81, 82, 84, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 105, 107, 108, 110, 114, 116, 117, 121, 125,  
127, 129, 130, 134, 135

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

Band: 1, 2, 8, 9, 17, 21, 23, 26, 30, 31, 41, 42, 52, 66, 68, 74, 90, 91, 92, 102, 122, 132

Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau  
der Universität für Bodenkultur,  
Nußdorfer Lände 11, A-1190 Wien

Band: 18, 19, 32, 38, 43, 44, 45, 48, 50, 55, 59, 60, 70, 75, 78, 86, 89, 93, 101, 106, 109,  
113, 123

Institut für Wasservorsorge, Gewässerökologie und Abfallwirtschaft  
der Universität für Bodenkultur,  
Nußdorfer Lände 11, A-1190 Wien

Band: 22, 29, 39, 40, 46, 67, 71, 72, 76, 77, 80, 83, 85, 87, 88, 94, 103, 112, 115, 118, 120,  
124, 126, 128, 131, 133

Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft der Universität für Bodenkultur,  
Nußdorfer Lände 11, A-1190 Wien

Band: 119