

Bemessung der Sauerstoffzufuhr

Gestaltung und Bemessung von Abwasserbehandlungsanlagen

Teil 1: Kommunale Kläranlagen - Grundkonzepte und Abwasserlinie

Wilhelm P. Frey

AAB Frey
Abwassertechnische
Ausbildung und Beratung



INHALT

- **Definitionen, Bezeichnungen und Umrechnungen**
- **Sauerstoffbedarf → Sauerstoffzufuhr in Reinwasser**
- **Lastfälle festlegen**
 - „**Normallastfall**“ (beste Wirtschaftlichkeit!)
 - **Minimallastfall – Maximallastfall - Revisionslastfall**
- **Druckbelüftung**
 - **Auswahl der Belüfterelemente**
 - **Bauform und Material**
 - **Anzahl und Anordnung der Belüfterelemente**
 - **Ermittlung des erforderlichen Luftvolumenstromes**
 - **Gebläseauswahl (Abstimmung auf den Regelbereich)**
- **Oberflächenbelüftung**
 - **Auswahl der Aggregate**
 - **Ermittlung der Baugröße und Anzahl**



Definitionen und Bezeichnungen (1)

- **Luftbeaufschlagung (LB)**
 - Luftvolumenstrom pro Fläche und Zeit (Stück, Meter, m^2)
 - Rohre 2-10 $m^3/m/h$
 - Teller 1-8 $m^3/Stk./h$
 - Platten 2-80 $m^3/m^2/h$
- **Belegungsdichte (BD)**
 - abgasende Belüfteroberfläche bezogen auf die Bodenfläche

HINWEIS: Bei Umlaufbecken wird nur der Sohlbereich in dem Belüfter montiert werden für die Berechnung der Belegungsdichte verwendet.

 - Rohre+Platten ca. 5-30%
 - Teller ca. 5-10%
- Hohe Belegungsdichte und niedrige Luftbeaufschlagung → hoher Sauerstofftrag (niedrige Betriebskosten aber höhere Investitionskosten)
- Kleine Belegungsdichte und hohe Luftbeaufschlagung → geringer Sauerstofftrag (hohe Betriebskosten aber niedriger Investitionskosten)

Definitionen und Bezeichnungen (2)

- **Standard-Sauerstoffzufuhr (Standard Oxygen Transfer Rate - SOTR) in Reinwasser [kg/Stunde]**
 - ist der Massenstrom an Sauerstoff, der pro Zeiteinheit im stationären Zustand von einer Belüftungseinrichtung beim Sauerstoffgehalt von $C_x = 0$ mg/l, bei einer Wassertemperatur von $T_W = 20$ °C und atmosphärischem Normaldruck ($p_{\text{atm}} = 101,325$ kPa) in einem mit Reinwasser gefüllten Becken bestimmter Größe gelöst wird.
- **Sauerstoffertrag in Reinwasser (Standard Aeration Efficiency SAE) [kg/kWh]**
 - ist die Masse an Sauerstoff (kg) bezogen auf die dafür erforderliche elektrische Arbeit (kWh), die einem mit Reinwasser gefüllten Becken pro Zeiteinheit im stationären Zustand und unter Standardbedingungen zugeführt wird. Die Leistungsaufnahme P (kW) der Belüftungseinrichtung ist gegebenenfalls einschließlich zugehöriger Mischeinrichtungen zu bestimmen, es gilt:

$$SAE = \frac{SOTR}{P}$$



Definitionen und Bezeichnungen (3)

- **spezifische Standard-Sauerstoffzufuhr SSOTR (Specific Standard Oxygen Transfer Rate) [g/m_N³/m]**
 - wird oft auch als **Sauerstoffausnutzung** bezeichnet
 - ist die Masse an Sauerstoff die von einem Kubikmeter Luft im Normzustand (DIN 1343 → 0°C; 101,325 kPa, trocken) pro Meter Einblastiefe in ein Becken übertragen wird. Es gilt:

$$SSOTR = \frac{SOTR}{h_D \times Q_{L,N}} \times 1000$$

- Bei der Bemessung kann nach Wahl einer Sauerstoffausnutzung der erforderliche Luftvolumenstrom berechnet werden. Es gilt:

$$Q_{L,N} = \frac{SOTR}{h_D \times SSOTR} \times 1000$$



Umrechnungen - Sauerstoffausnutzung

- Die Sauerstoffausnutzung kann unterschiedlich angegeben werden:
 - **Gramm Sauerstoff pro Kubikmeter Luft (im Normzustand) und Meter Einblastiefe [g/m_N³/m]**

$$SSOTR = \frac{SOTR}{h_D \times Q_{L,N}} \times 1000 \quad \left[\frac{g}{m_N^3 \times m} \right]$$

- **Masseprozent Sauerstoff pro Meter Einblastiefe [%/m]**

$$SSOTE = \frac{SOTR}{h_D \times Q_{L,N} \times 0,3} \times 100 \quad \left[\frac{\%}{m} \right]$$

- Als Normbedingungen von Luft werden eine Temperatur von 0° Celsius und ein Druck von 101,325 kPa bezeichnet. Die Luftfeuchte ist Null.
- Ein Normkubikmeter (trockener) Luft hat eine Masse von 1,293 kg. Berücksichtigt man die Zusammensetzung der Luft und die unterschiedlichen Molekülmassen der Luftbestandteile (Sauerstoff, Stickstoff, Edelgase, ...), kann man ausrechnen, das in einem Normkubikmeter trockener Luft 300 g Sauerstoff enthalten sind.
- **BEISPIEL**: In ein Belebungsbecken mit einer Einblastiefe von 4,3 Meter werden mit einem Luftvolumenstrom von 1900 m_N³/h eine Sauerstoffzufuhr (SOTR) von 170 kg/h erreicht.

Die Sauerstoffausnutzung beträgt: $SSOTR = 170 \times 1000 / 1900 / 4,3 = 20,8 \text{ g/m}_N^3/\text{m}$
 $SSOTE = 20,8 / 3 = 6,9 \text{ \%/m}$
 $SOTE = 6,9 \times 4,3 = 29,8 \text{ \%}$



Umrechnungen - Luftvolumenstrom

- Als Normbedingungen von Luft (DIN 1343) werden eine Temperatur von 0° Celsius (273,15 K und ein Druck von 101,325 kPa bezeichnet. Die Luftfeuchte ist Null.

- Die Umrechnung des Volumenstromes erfolgt mittels der Zustandsgleichung für ideale Gase. Es gilt:

$$Q_1 = Q_2 \times \frac{T_1 \times p_2}{T_2 \times p_1}$$

Q [m³/h]... Luftvolumenstrom
 T [K]Lufttemperatur
 p [kPa] Luftdruck

- Umgebungsluft enthält auch Wasserdampf. Diese wird mit der relativen Luftfeuchte angegeben und mit φ (fi) bezeichnet.
- Die relative Feuchte ist der Quotient des vorhandenen Wasserdampfdruckes dividiert durch den Sättigungsdampfdruck. Der Sättigungsdampfdruck ist in Tabellenwerken zu finden.

Temperatur	Sättigungsdampfdruck
[°C]	[kPa]
0	0,611
5	0,873
10	1,225
15	1,706
20	2,339
25	3,170
30	4,247

- Für die Umrechnung des feuchten Ansaugvolumenstromes in den Normzustand trockene Luft muss der Wasserdampfanteil abgezogen werden.

$$Q_{1,t} = Q_{2,f} \times \frac{T_1 \times (p_2 - p_{s,2} \times \varphi_2)}{T_2 \times p_1}$$

Q [m³/h]... Luftvolumenstrom
 T [K]Lufttemperatur
 p [kPa] Luftdruck
 φ [-]Luftfeuchte

Indizes:
 1, 2 ... z. B. Normzustand, Ansaugzustand
 t trocken
 f feucht
 s gesättigt



Sauerstoffbedarf → Sauerstoffzufuhr in Reinwasser

- Der **Sauerstoffbedarf** (OV) wird im Rahmen der abwassertechnischen Berechnung für die verschiedenen Lastfälle ermittelt (z. B. DWA A 131). Hier sind auch besondere Betriebsweisen z. B. intermittierender Betrieb der Belüftung zu berücksichtigen.
- Aus dem Sauerstoffbedarf muss nun für alle Lastfälle die erforderliche **Sauerstoffzufuhr** in Reinwasser (SOTR) unter Standardbedingungen ermittelt werden (z. B. DWA M 229-1).
 - Kläranlagenstandort (Luftdruck, Temperatur, ...)
 - Beckengeometrie (Beckentiefe)
 - Abwasserbeschaffenheit (α -Wert)

$$SOTR = \frac{f_d \cdot C_{S,20}}{\alpha \cdot \left(f_d \cdot C_{S,T} \cdot \frac{p_{atm}}{1.013} - C_x \right) \cdot \theta^{(T_w - 20)}} \cdot OV_h$$

f_d [-] Tiefenfaktor bei der Druckluftbelüftung
$C_{s,20}$ [mg/L]	... Sauerstoffsättigungskonzentration bei 20 °C
OV_h [kg/h] stündlicher Sauerstoffverbrauch
α [-] α -Wert (Grenzflächenfaktor)
$C_{s,T}$ [mg/L] Sauerstoffsättigungskonzentration bei T_w
p_{atm} [hPa] Atmosphärischer Luftdruck am Anlagenstandort
C_x [mg/L] Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken
θ [-] Temperaturkorrekturfaktor (=1,024)
T_w [°C] Wassertemperatur im Belebungsbecken



Bemessung Druckbelüftung

Folgende Schritte sind unter Berücksichtigung der **Lastfälle** durchzuführen:

- Belüfterelemente auswählen (Varianten prüfen!)
 - Tellerbelüfter, Rohrbelüfter, Plattenbelüfter
- Ermittlung des erforderlichen Luftvolumenstromes
- Festlegung der Anzahl und Anordnung der Belüfter
 - Abstimmung mit den abwassertechnischen Anforderungen
 - Nitrifikation – Denitrifikation
 - Regelstrategie (intermittierende Belüftung!)
- Auswahl der Druckluftherzeuger
 - Art, Anzahl, **Regelbereich**, Schaltpunkte der Gebläse
- Nachrechnung der Leistungsfähigkeit
 - Regelbereich beachten
 - Nachweis der Wirtschaftlichkeit im „Normalbetrieb“



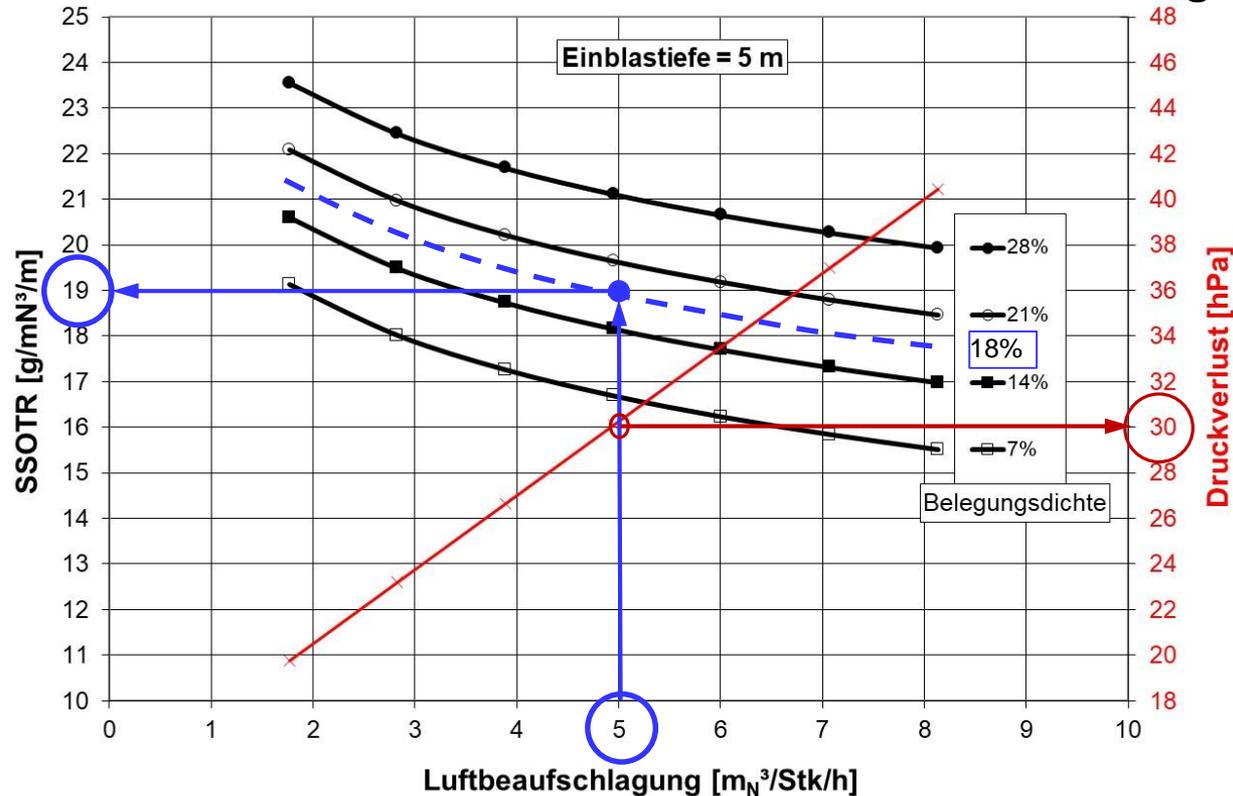
Hinweise zur Auswahl der Belüfterelemente

- **Abwasserinhaltsstoffe** beachten (Beständigkeit prüfen!)
- Die Luftbeaufschlagung beeinflusst die Wirtschaftlichkeit im Regelbetrieb → **minus 15%**
- Der Auslegungspunkt ist realistisch zu wählen
 - **30 bis 50% der Maximalbeaufschlagung**
- Zu kleine Luftbeaufschlagungen verursachen **ungleichmäßiges Abgasen** → Verschlechterung der Wirtschaftlichkeit.
- Die SOTE-Werte gelten nur für die im Datenblatt genannte **Einblastiefe**! Steigt die Einblastiefe, so sinkt die Sauerstoffausnutzung und umgekehrt. Sicherheiten einrechnen!
- Statt der Belegungsdichte werden von den Herstellern oft **andere Bezugsgrößen** verwendet, z.B. Anzahl Belüfter pro m² Beckenboden



Ermittlung des Luftvolumenstromes

- Für den betrachteten Belüftertyp wird aus dem Datenblatt des Herstellers eine mittlere Sauerstoffausnutzung gewählt.



Damit berechnet man den für den „Normallastfall“

erforderlichen Luftvolumenstrom:
$$Q_{L,N} = \frac{SOTR}{h_D \times SSOTR} \times 1000$$

Ermittlung der Belüfteranzahl

- Mit dem erforderlichen Luftvolumenstrom und der angenommenen Luftbeaufschlagung wird die Anzahl der Belüfterelemente berechnet.

Es gilt:

$$\text{Anzahl} = \frac{Q_{L,N}}{\text{Luftbeaufschlagung}} \quad [\text{Stück}]$$

- Kontrolle der Luftbeaufschlagung für die anderen Lastfälle mit der berechneten Belüfteranzahl.
 - **Minimallastfall**: Unterschreitung der Luftbeaufschlagung muss vermieden werden (ungleiches Abgasen, Verstopfungsgefahr!). Hier kann durch Abstellen einzelner Belüfterfelder der Regelbereich vergrößert werden.
 - **Maximallastfall** und **Revisionslastfall**: Überschreitung der Luftbeaufschlagung (für den Dauerbetrieb) muss vermieden werden.
 - Bei Überschreitung muss die Belüfteranzahl erhöht und der Berechnungsgang wiederholt werden.
- Nun wird ein erster Entwurf für die Anordnung der Belüfter an der Beckensohle erstellt und die Belüfteranzahl gewählt.
 - Falls erforderlich wird der Berechnungsgang wiederholt.



Erforderliche Druckerhöhung

- Um ein Gebläse auszuwählen muss die erforderliche Druckerhöhung berechnet werden. Folgende Druckverluste sind zu berücksichtigen:
 - Saugseitige Verluste (Filter, Ansaugregister, ...)
 - Rohrleitungsverluste (Schieber, Klappen, Messgerät, Transportleitung zum Becken, Falleleitungen, Verteilleitungen im Becken, ...)
 - Druckverlust des Belüfterelementes (neu – gebraucht!)
 - hydraulischer Druck
 - Reserve für Alterung/Verstopfung der Belüfterelemente
- Im Regelfall wird man eine erste Abschätzung mit folgenden Werten vornehmen:
 - hydraulischer Druck ($p_{\text{hydr.}}$ [kPa] = 9,81 [kPa/m] x Einblastiefe [m])
 - Druckverlust der Belüfterelemente (aus Datenblatt)
 - sonstige Verluste plus Reserve (ohne Messgerät) → 10 kPa

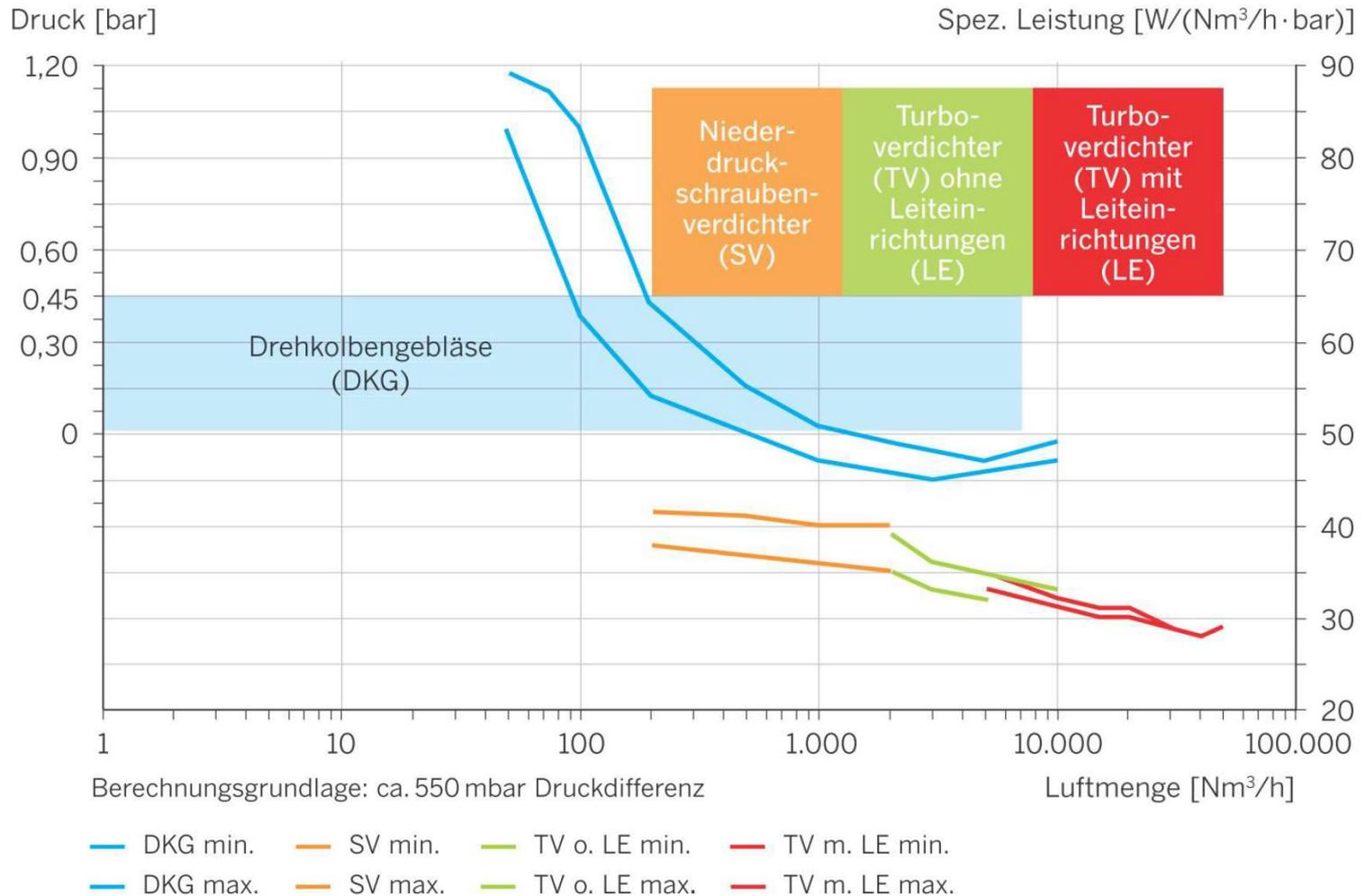


Gebläseauswahl (1)

- In Abhängigkeit der Größe der Anlage, der Beckenanzahl und Regelstrategie (Nitrifikation-Denitrifikation) ist die **Art** und die **Anzahl** der Gebläse festzulegen.
- **kleine Anlagen** mit wenigen Becken
 - zu den Becken zugeordnete Gebläse plus ein Reservegebläse
- **größere Anlagen** mit mehreren Becken
 - zentrale Gebläsestation mit Sammelschiene
- Die Bereitstellung der Luft soll über den Regelbereich mit möglichst geringem Energieaufwand erfolgen.
 - bei bestehenden Anlagen ist eine **Summenhäufigkeitsverteilung** der tatsächlich benötigten **Luftvolumenströme** zu erstellen
 - die Grundlast ist mit energetisch wirtschaftlichen Aggregaten abzudecken
 - der **Teillastbetrieb** und der **Maximallastbetrieb** kann mit **einfacheren/kostengünstigeren** Aggregaten abgedeckt werden



Gebälausewahl (2)



Quelle: G. Seibert-Erling: Moderne Druckluftherzeuger für eine energieeffiziente Belüftung
 IWAR 7. Infotag Belüftung am 02.11.2023 in Darmstadt



Bemessungsbeispiel – Druckbelüftung (1)

- Angaben
 - 2 Stück Umlaufbecken je 40m x 14m; Einblastiefe 5 m, je Becken 1 Rührwerk mit 2,8 kW
 - Sauerstoffzufuhr (Normallastfall) pro Becken $SOTR > 350 \text{ kg/h}$
 - pro Becken $SOTR_{\min} = 130 \text{ kg/h}$;
pro Becken $SOTR_{\max} = SOTR_{\text{Revision}} = 480 \text{ kg/h}$
 - Sauerstoffertrag im Normallastfall $SAE > 4,5 \text{ kg/kWh}$
- Annahmen
 - $SSOTR = 19 \text{ g/m}_N^3/\text{m}$ (siehe Folie 9)
 - Luftbeaufschlagung = $5 \text{ m}_N^3/\text{Stk/h}$ (siehe Folie 9)
 - 50 % der Beckengrundfläche mit Belüftern belegbar
 - Tellerbelüfter Type XYZ
 - abgasenden Fläche von $0,07 \text{ m}^2/\text{Stk}$
 - minimale Luftbeaufschlagung = $1,5 \text{ m}_N^3/\text{Stk/h}$
 - maximale Luftbeaufschlagung = $8,5 \text{ m}_N^3/\text{Stk/h}$



Bemessungsbeispiel – Druckbelüftung (2)

- erforderlicher Luftvolumenstrom pro Becken

$$Q_{L,N} = \frac{SOTR}{h_D \times SSOTR} \times 1000 = \frac{350}{5 \times 19} \times 1000 = 3684 \text{ m}_N^3/\text{h}$$

Hinweis: Die Umrechnung auf den Ansaugvolumenstrom mit einem Ansaugdruck von 99 kPa, einer Ansaugtemperatur von 25 °C sowie einer Ansaugfeuchte von $\varphi = 70\%$ ergibt:

$$Q_{2,f} = Q_{1,t} \times \frac{T_2 \times p_1}{T_1 \times (p_2 - p_{s,2} \times \varphi_2)} = 3684 \frac{(273,15 + 25) \times 101,325}{273,25 \times (99 - 3,17 \times 0,7)} = 4210 \text{ m}^3/\text{h}$$

- Anzahl Belüfter pro Becken

$$\text{Anzahl} = \frac{Q_{L,N}}{\text{Luftbeaufschlagung}} = \frac{3684}{5} = 734 \text{ Stück}$$

- Nachrechnung der Belegungsdichte

- belegte Bodenfläche = $40 \times 14 \times 0,5 = 280 \text{ m}^2$
- abgasende Fläche = $734 \times 0,07 = 51,4 \text{ m}^2$
- Belegungsdichte = $51,4 / 280 \times 100 = 18,4 \%$ → OK!



Bemessungsbeispiel – Druckbelüftung (3)

- Minimallastfall

- Anzahl Belüfter = 734 Stück pro Becken
- Annahme SSOTR = 21,5 g/m_N³/m

$$Q_{L,N} = \frac{SOTR}{h_D \times SSOTR} \times 1000 = \frac{130}{5 \times 21} \times 1000 = 1209 \text{ m}_N^3/\text{h}$$

- Nachrechnung der minimalen Luftbeaufschlagung
Luftbeaufschlagung = 1209 / 734 = 1,65 m_N³/Stk/h
– Kontrolle im Diagramm → OK!

- Maximallastfall

- Anzahl Belüfter = 734 Stück pro Becken
- Annahme SSOTR = 18,0 g/m_N³/m

$$Q_{L,N} = \frac{SOTR}{h_D \times SSOTR} \times 1000 = \frac{480}{5 \times 18} \times 1000 = 5333 \text{ m}_N^3/\text{h}$$

- Nachrechnung der minimalen Luftbeaufschlagung
Luftbeaufschlagung = 5333 / 734 = 7,3 m_N³/Stk/h
– Kontrolle im Diagramm → OK!



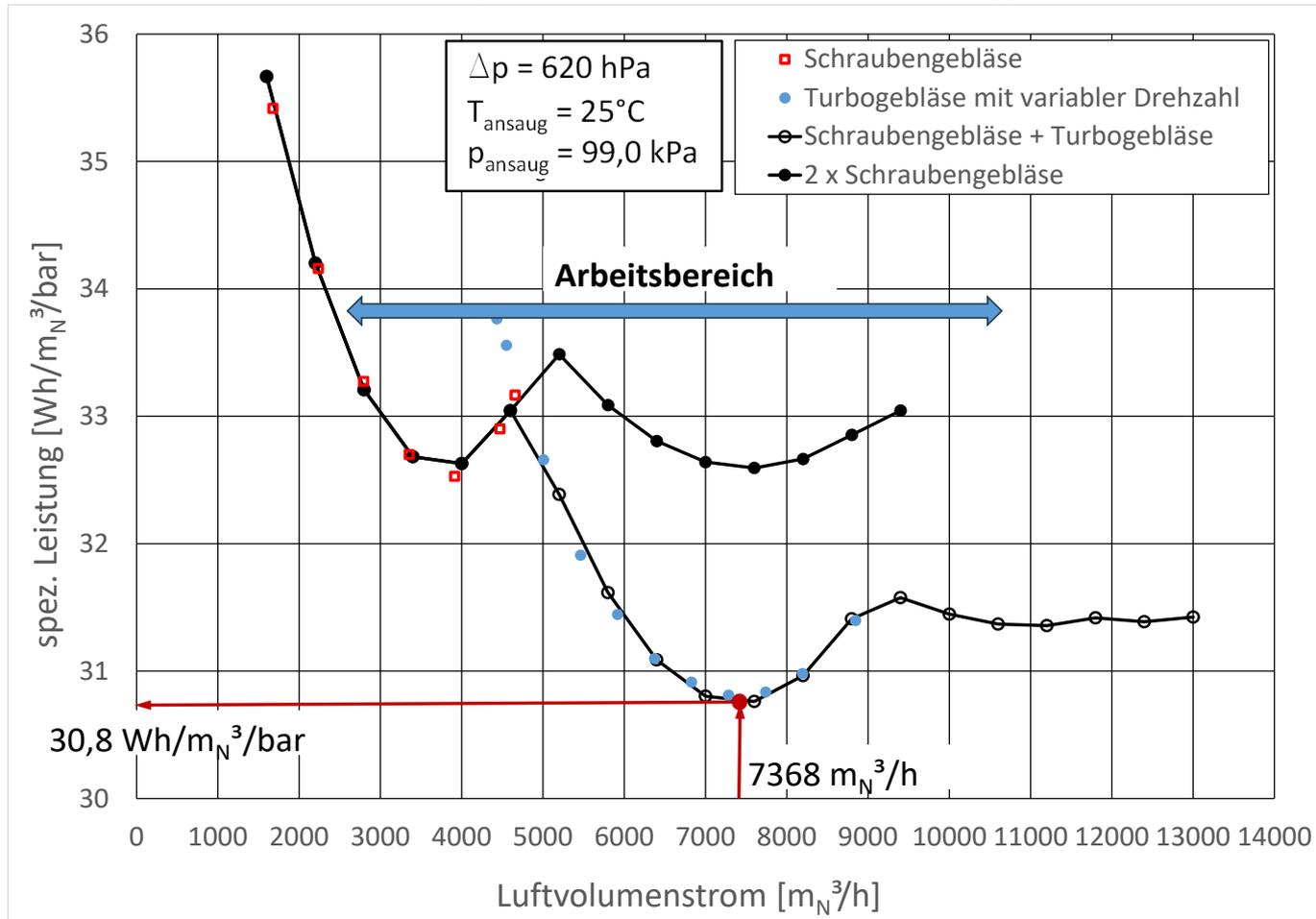
Bemessungsbeispiel – Druckbelüftung (4)

- erforderliche Drucksteigerung im Gebläse
 - $p_{\text{hydr}} = 9,81 \times 5 = 49,0 \text{ kPa}$
 - $\Delta p_{\text{Belüfter}} = 3,0 \text{ kPa}$
 - sonstige Druckverluste = 10 kPa
 - Summe = 62 kPa (dieser Wert wird für die Berechnung des garantierten Sauerstoffertes verwendet)
 - Die Auslegung des Gebläses erfolgt mit einer Reserve für die Verstopfung und Alterung der Belüfter von 10,0 kPa → 72,0 kPa
- Gebläseauswahl
 - Minimaler Luftvolumenstrom: $2 \times 1209 \text{ m}_N^3/\text{h}$ (2418 m_N^3/h)
 - Häufigster Luftvolumenstrom: $2 \times 3684 \text{ m}_N^3/\text{h}$ (7368 m_N^3/h)
 - Maximaler Luftvolumenstrom: $2 \times 5333 \text{ m}_N^3/\text{h}$ (10666 m_N^3/h)
 - Regelbereich der Gebläsestation → 2418 bis 10666 m_N^3/h
 - gewählt: 1+1 Stück Schraubengebläse 1600 bis 4500 m_N^3/h
1 Stück Turbogebläse 4500 bis 8800 m_N^3/h



Bemessungsbeispiel – Gebläseauswahl

- Gebläseauswahl
 - gewählt: 1+1 Stück Schraubengebläse 1600 bis 4500 m_N^3/h
1 Stück Turbogebälse 4500 bis 8800 m_N^3/h



Bemessungsbeispiel – Sauerstoffertrag

- Für den „Normallastfall“ mit einem Luftvolumenstrom von $2 \times 3684 = 7368 \text{ m}_N^3/\text{h}$ berechnet man die erforderliche Leistung der Gebläse zu:

$$\text{spez. } P = \frac{P_{\text{Gebläse}}}{Q_{\text{Luft}} \times \Delta p_{\text{Gebläse}}} \rightarrow P_{\text{Gebläse}} = \text{spez. } P \times Q_{\text{Luft}} \times \Delta p_{\text{Gebläse}}$$

$$P_{\text{Gebläse}} = 30,8 \times 7368 \times 0,62 = 140700 \text{ W} = 140,7 \text{ kW}$$

- Damit berechnet man den Sauerstoffertrag zu:

$$SAE = \frac{SOTR}{P_{\text{Gebläse}} + PR_{\text{ührwerke}}} = \frac{700}{140,7 + 5,6} = 4,8 \text{ kg/kWh}$$

- Der berechnete Sauerstoffertrag ist größer als der Garantiewert → OK!
 - Ist er kleiner, muss die Berechnung mit einer **größeren Anzahl** von **Belüfterelementen** wiederholt werden!

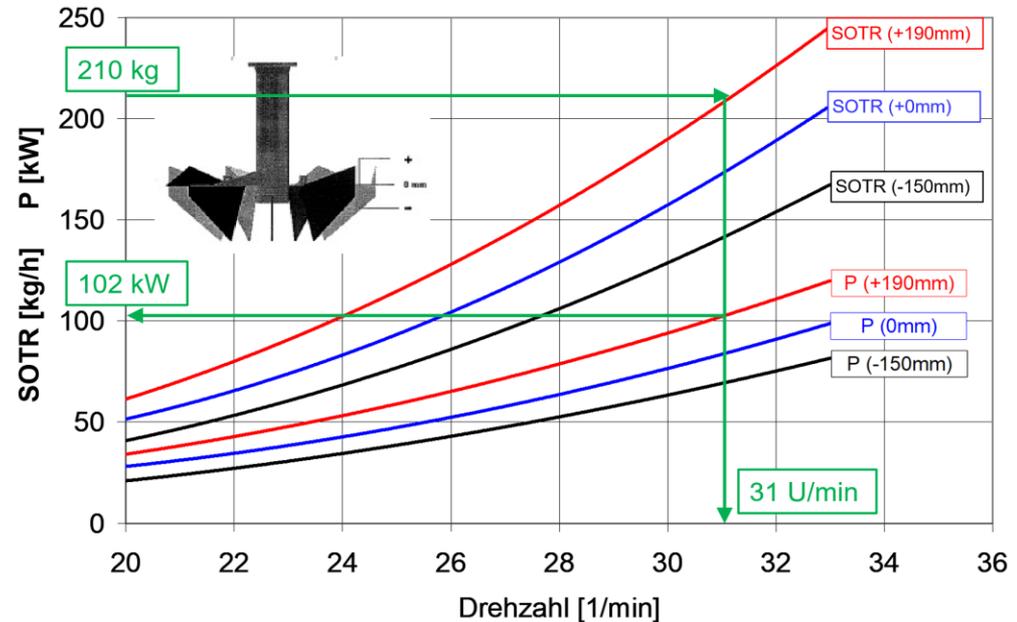
Bemessung Oberflächenbelüftung

- Die Anbieter von Walzen- und Kreiselbelüftern haben für ihre Aggregate Leistungsdiagramme für die Auslegung.
- Folgende Parameter beeinflussen die Leistungsfähigkeit
 - Geometrie des Belüfters (Durchmesser)
 - Drehzahl bzw. Umfangsgeschwindigkeit des Belüfters
 - Eintauchtiefe des Belüfters (Achtung bei Kreisel auf den Nullpunkt)
- Bei der Auswahl eines Oberflächenbelüfters ist in besonderem Maß auf die erforderliche Beckengeometrie zu achten.



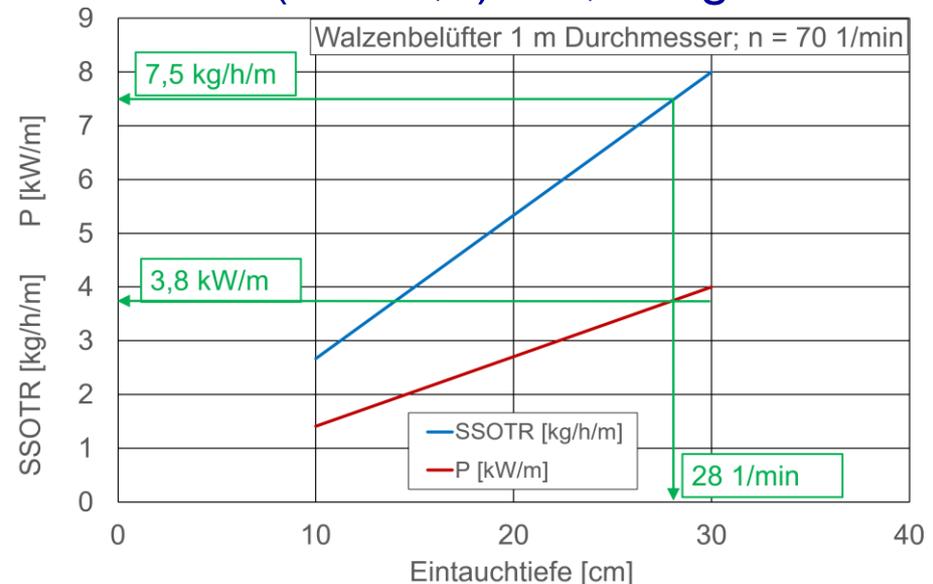
Bemessungsbeispiel – Kreiselbelüfter

- Angaben
 - 1 Stück Mischbecken 20m x 20m; Beckentiefe 2,7 m
 - Sauerstoffzufuhr (Maximallastfall) pro Becken SOTR > 210 kg/h
 - Sauerstoffertrag im Maximallastfall SAE > 1,9 kg/kWh
- Bemessung
 - $SAE = 210 / 102 = 2,1 \text{ kg/kWh} > 1,9 \text{ kg/kWh} \rightarrow \text{OK!}$
 - Regelbereich kann durch Drehzahl und Eintauchtiefe abgedeckt werden.
 - Sauerstoffertrag in weitem Bereich konstant.



Bemessungsbeispiel – Walzenbelüfter

- Angaben
 - 1 Stück Umlaufbecken 67m x 20m; Beckentiefe 3,5 m
 - Sauerstoffzufuhr (Maximallastfall) pro Becken SOTR > 130 kg/h
 - Sauerstoffertrag im Maximallastfall SAE > 1,9 kg/kWh
- Bemessung
 - gewählt 2 Stück Walzenbelüfter mit 1m Durchmesser, L= 9m
SOTR = 2x9x7,5 = 135 kg/h; SAE = 135/(2x9x3,8) = 1,97 kg/kWh
Regelbereich kann durch Drehzahl und Eintauchtiefe abgedeckt werden.
 - Sauerstoffertrag in weitem Bereich konstant.





FRAGEN?

Wilhelm Frey
aab.frey@kabsi.at
www.aabfrey.com