

## 5.3 Belebungsverfahren

### 5.3.1 Anlagendesign

#### ALLGEMEINES UND REAKTORTYPEN

Entsprechend den in Abschnitt 5.1 angeführten Grundlagen sind die folgenden Punkte für das Belebungsverfahren maßgeblich:

- Erhaltung einer ausreichenden Zahl von **Mikroorganismen** im Reaktor,
- Einhaltung einer ausreichenden **Sauerstoffversorgung** (für Kohlenstoffentfernung und Nitrifikation),
- Gewährleistung einer guten **Durchmischung** des Schlamm-Abwassergemisches.

Technisch werden diese Bedingungen beim Belebungsverfahren durch die Maßnahmen

- Rückführung von Biomasse durch **Abtrennung** in einer (nachgeschalteten) **mechanischen Reinigungsstufe** oder **zeitlich getrennt in einem Becken**
- Deckung des Sauerstoffbedarfes durch **künstliche Belüftung**,
- Gewährleistung des Stoffaustausches zwischen Belebtschlamm, Abwasserinhaltsstoffen und Sauerstoff durch **Zwangsumwälzung**

erreicht.

Alle technischen Varianten des Belebungsverfahrens haben die wirtschaftlich optimale und betriebssichere Anwendung dieser Maßnahmen zum Ziel. Das grundlegende Prinzip einer Belebungsanlage ist in Abbildung 5.3-1 dargestellt.

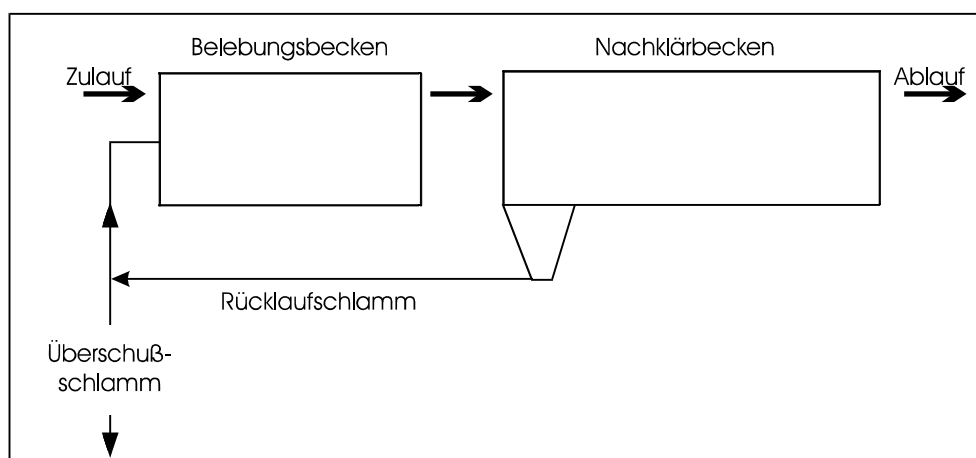


Abbildung 5.3-1: Prinzipieller Aufbau einer Belebungsanlage im Durchlaufbetrieb

Die Varianten können nach der Bauform (Durchmischung)

- total durchmischte Becken oder
- pfropfenförmig (kaskadenförmig) durchströmte Becken sein

Weitere Einteilungen beziehen sich auf unterschiedliche technische Ausführungen.

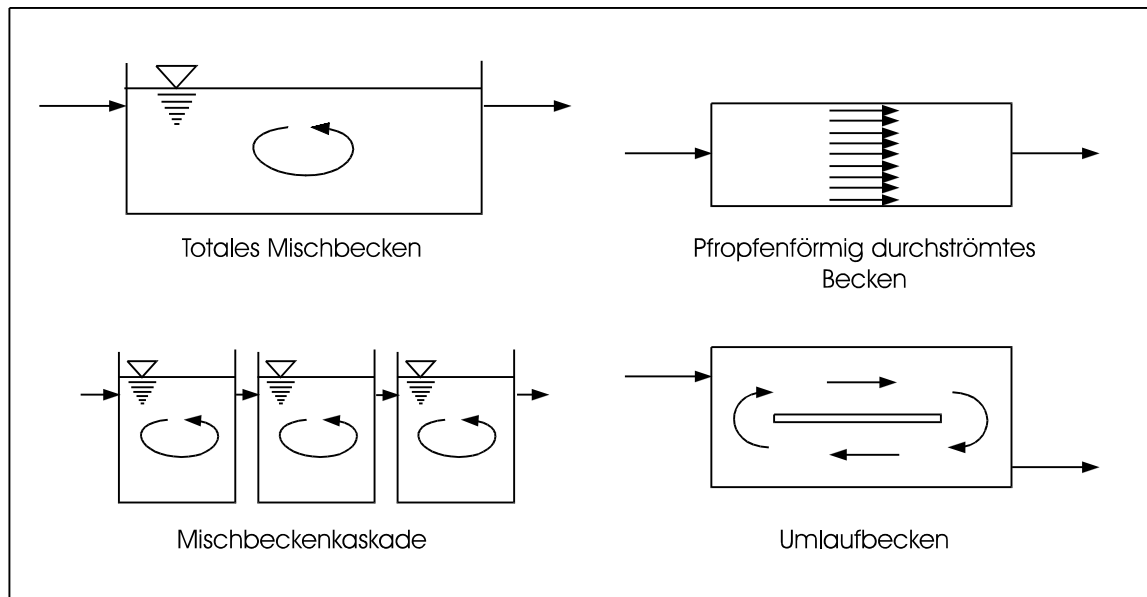


Abbildung 5.3-2: Belebungsverfahren, Bauformen

Aus Gründen der Betriebssicherheit ist es zumindest bei größeren Anlagen sinnvoll, mehrere Straßen parallel anzuordnen.

Der Abbau der organischen Abwasserinhaltsstoffe sowie die biologische Stickstoff- und Phosphorelimination erfordern die Bereitstellung entsprechender Milieubedingungen (vergl. Abschnitt 5.1.2 - 5.1.4) in den Reaktoren.

Nachfolgend sind in Abbildung 5.3-3 mögliche Verfahrensvarianten kontinuierlich durchströmter Belebungsanlagen dargestellt. Die dargestellten Varianten benötigen eine räumlich getrennte mechanische Reinigungsstufe, um den ausgetragenen Belebtschlamm vom Abwasser abzutrennen und wieder in das Belebungsbecken zurückzuführen.

Eine Besonderheit in dieser Hinsicht stellen die Sequencing **B**atch **R**eactor Verfahren (SBR-Verfahren) dar, bei denen die Abtrennung des Belebtschlammes zeitlich getrennt im selben Becken erfolgt (siehe Abbildung 5.3-4).

Das SBR-Verfahren ist eine verhältnismäßig einfache Variante des Belebtschlamm-Verfahrens. Im Gegensatz zu den raumorientierten, kontinuierlich durchflossenen Verfahren ist das SBR-Verfahren ein zeitorientierter Prozess mit einer zyklischen Abfolge der Phasen:

- a) Füllen
- b) Rühren/Belüften (Reaktionsphase)
- c) Absetzen
- d) Entleeren
- e) (Stillstandsphase)

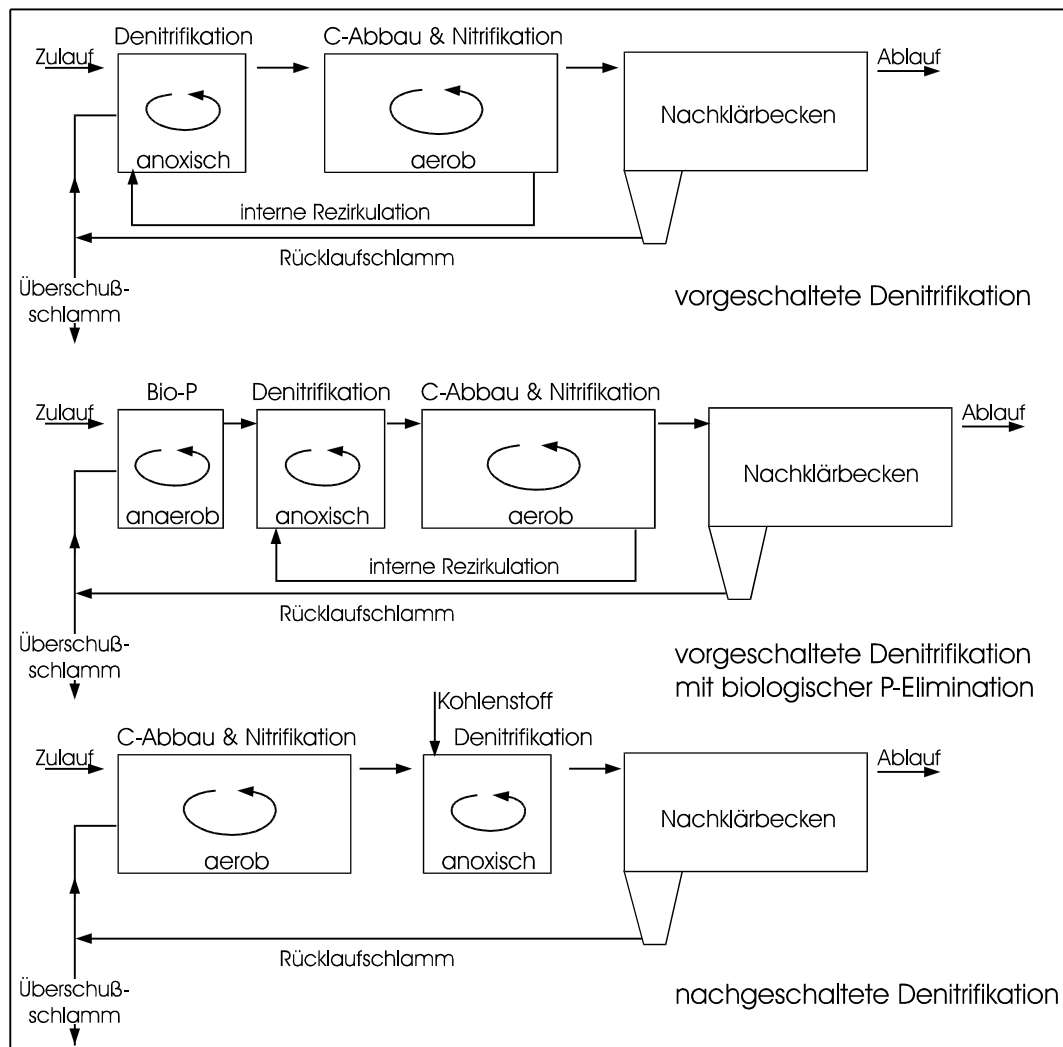


Abbildung 5.3-3: Belebungsanlagen, Verfahrensvarianten

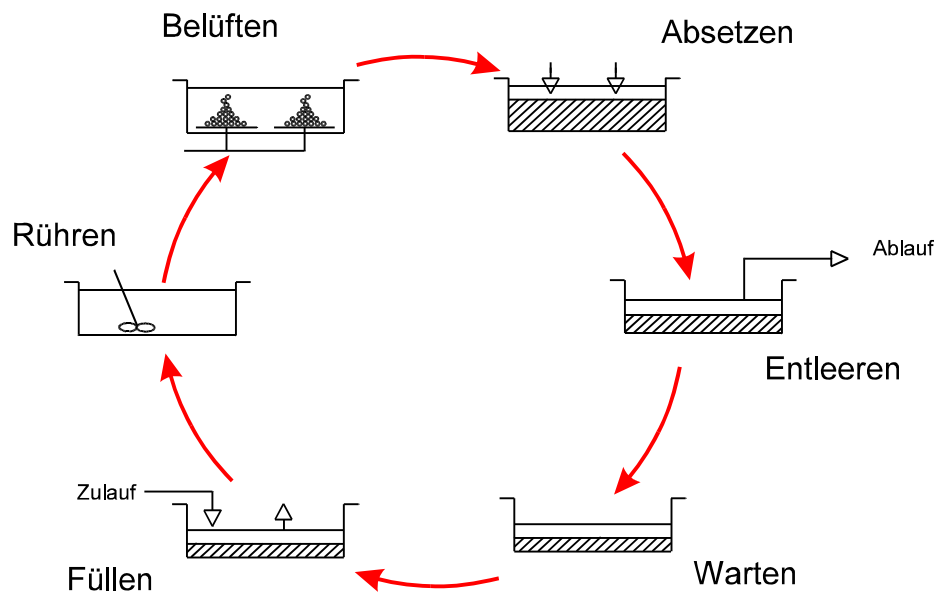


Abbildung 5.3-4: Schematische Darstellung des SBR-Prozessablaufs

Der SBR-Reaktor wird als Belebungsbecken (Reaktionsraum) und als Sedimentationsbecken genutzt. Beim Ablauf des gereinigten Abwassers verbleibt die sedimentierte Biomasse im Reaktor. Der Anteil des ausgetauschten Reaktorvolumens (Volumenaustauschverhältnis) kann je nach Abwasserart, Verfahrensziel und den erzielten Schlammabsetzeigenschaften variiert werden.

Mit der Abfolge der einzelnen Prozessphasen beim SBR-Betrieb wird die gleiche Abfolge von Reaktionsbedingungen geschaffen wie in einem längsdurchströmten kontinuierlich durchflossenen Belebungsbecken (Rohrreaktor) bzw. einer Kaskadenanlage. Wegen des Fehlens einer Rückführung von abgesetztem Belebtschlamm beim SBR-Verfahren sind allerdings die jeweiligen Reaktionsverhältnisse leichter zu kontrollieren bzw. zu verändern.

Darüber hinaus können noch Sonderverfahren, wie z.B.

- Druckbelebung,
- Deep-Shaft-Verfahren,
- Reinsauerstoffbegasung,
- A-B- Verfahren oder
- Kombination mit Aufwuchsflächen,

unterschieden werden.

**BELÜFTUNGSSYSTEME**

Belüfter in Belebungsanlagen sollen bei geringem **Energieaufwand** die folgenden Aufgaben erfüllen:

- Deckung des **Sauerstoffbedarfes** für Kohlenstoffabbau und Nitrifikation
- **Regelbarkeit** und **Betriebssicherheit**
- **Durchmischung** des Abwasser-Schlamm-Gemisches (mit Einschränkungen)

In bestimmten Fällen kann eine Trennung der Funktionen Sauerstoffzufuhr und Durchmischung sinnvoll sein, z.B. bei nieder belasteten Verfahren (z.B. simultane Stabilisierung) oder zur Gewährleistung zeitlich unterschiedlicher Verhältnisse im Reaktor (zeitlich getrennte Denitrifikation). Die Durchmischung muss u.U. separat (Propeller) gewährleistet werden.

Üblicherweise wird der benötigte Sauerstoff durch atmosphärische Luft in das Becken eingetragen. In Sonderfällen (bei hohem Bedarf) kann reiner Sauerstoff eingebracht werden.

Die Belüftungssysteme können grundsätzlich in

- Druckbelüftung (fein-, mittel- und grobblasig) und
- Oberflächenbelüftung (Walzen-, Kreiselbelüftung)

unterschieden werden.

Die **Ausnutzung** des eingetragenen Sauerstoffes ist von folgenden Faktoren abhängig:

- Einblastiefe (bei Druckluftbelüftern),
- Beckentiefe, Eintauchtiefe (bei Oberflächenbelüftern),
- Luftblasengröße (Austauschoberfläche) und
- Turbulenz.

Einige mögliche konstruktive Ausführungen von Druckluft- und Oberflächenbelüftungssystemen sind in Abbildung 5.3-5 dargestellt.

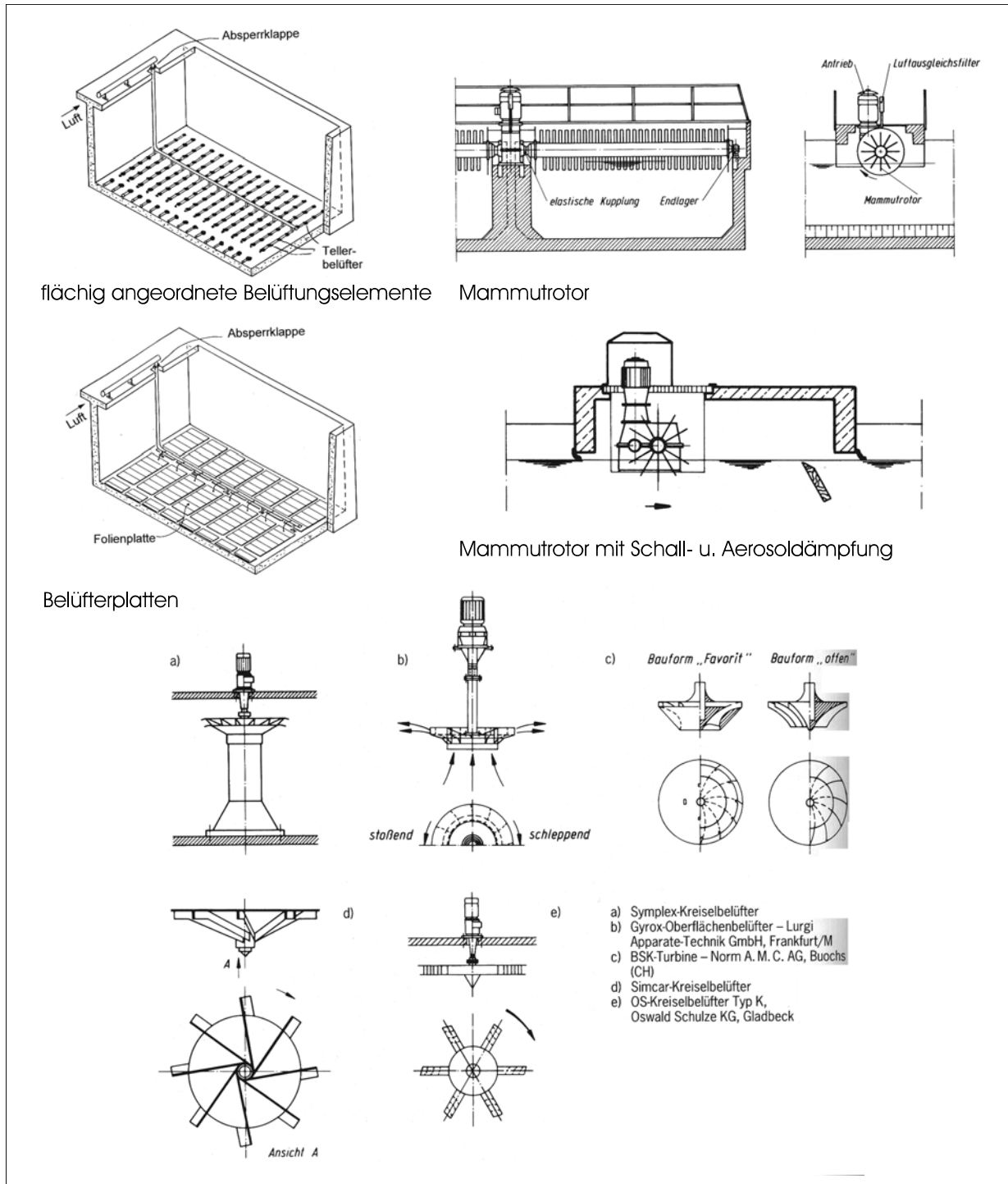


Abbildung 5.3-5: Konstruktive Ausbildungen von Druckluft- und Oberflächenbelüftungssystemen

### 5.3.2 Dimensionierungsparameter

Die nachfolgend definierten Faktoren sind für die Dimensionierung des Belebungsverfahrens, d.h. der entsprechenden Anlagenteile, erforderlich.

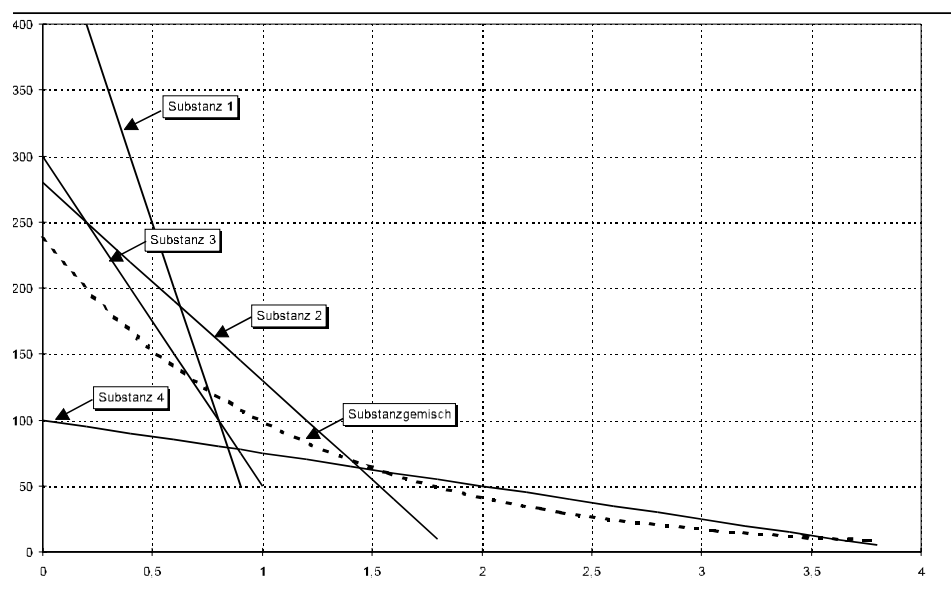
#### SUBSTRAT

##### – Sauerstoff

Sauerstoff wird von den Mikroorganismen beim Abbau organischer Verbindungen und bei der Nitrifikation als terminaler Elektronenakzeptor (also eigentlich nicht als Substrat) verwendet. Der **Sauerstoffgehalt** beeinflusst die Umsatzgeschwindigkeit entsprechend einer Monod-Kinetik. Für eine unlimitierte Umsatzgeschwindigkeit ( $O_2 \gg K_{O_2}$ ) ist eine Konzentration von 0,5 - 1,0 mg/l (Kohlenstoffabbau) bzw. ca. 2 mg/l (Nitrifikation) erforderlich.

Der spezifische Sauerstoffbedarf setzt sich zusammen aus dem Substrat-Sauerstoffverbrauch (belastungsabhängig) und dem endogenen Sauerstoffverbrauch des aktiven Anteiles der Biomasse (grob 0,1 kg  $O_2$ / (kg TS.d)).

Der prinzipielle Einfluss der **Belüftungszeit** auf den Reinigungsverlauf bei Abwasser ist in Abbildung 5.3-6 dargestellt. Einzelne Substanzen werden grundsätzlich linear mit der Zeit entfernt (bei nicht limitierend wirkenden Konzentrationen). Eine Beurteilung nach einem Summenparameter (BSB<sub>5</sub>, CSB) bezieht unterschiedlich schnell abbaubare Substanzen mit ein, die Konzentrationsabnahme ist daher (und auf Grund von Substratlimitierung) nicht mehr linear sondern nähert sich asymptotisch einem Endwert an.



*Abbildung 5.3-6: Prinzipieller Reinigungsverlauf für Einzelsubstanzen und Substanzgemische (nach ATV, 1997)*

– **organische (Kohlenstoff-) Parameter**

Die Abbauleistung (Abbaugeschwindigkeit) wird einerseits durch die Zusammensetzung der pauschal als BSB<sub>5</sub> oder CSB beurteilten organischen Fracht und andererseits durch das Schlammalter ( $t_{TS} [d] = TS_{BB} [gTS/l] / \dot{U}S_R [kg/m^3 \cdot d]$  mittlere "Feststoffaufenthaltszeit") beeinflusst. Traditionell wird auch die spezifische Belastung der Biomasse ( $B_{TS} [kg \text{ BSB( od. CSB) / kg TS} \cdot d]$ ) als Parameter verwendet. Für den Zusammenhang zwischen Schlammalter, Belastung und Absetzverhalten wird auf das in den Übungsunterlagen enthaltene Arbeitsblatt ATV-A 131 verwiesen.

Abhängig vom Dimensionierungsverfahren wird die organische Belastung als Summenparameter angesetzt oder in gelöste und ungelöste sowie in leicht, normal und nicht **abbaubare Teile** getrennt. Besonders für die Dimensionierung der Denitrifikation und der biologischen Phosphorentfernung ist eine Abtrennung des leicht abbaubaren Anteiles des Gesamt-CSB sinnvoll.

Neben der Abhängigkeit der Reinigungsleistung von der Belüftungszeit (Abbildung 5.3-6) ist eine deutlich stärkere Abhängigkeit von der **spezifischen Biomassebelastung** gegeben. Eine grundsätzliche Darstellung befindet sich in Abbildung 5.3-7. Der Einfluss der Belüftungszeit und des Biomassegehaltes ist in Abbildung 5.3-8 dargestellt.

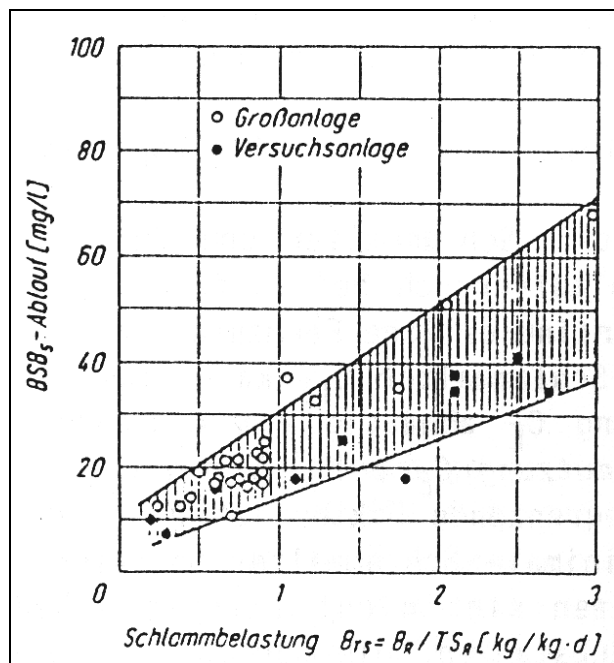


Abbildung 5.3-7: BSB<sub>5</sub>-Abbau in Abhängigkeit von der Schlammbelastung (aus ATV 1997).

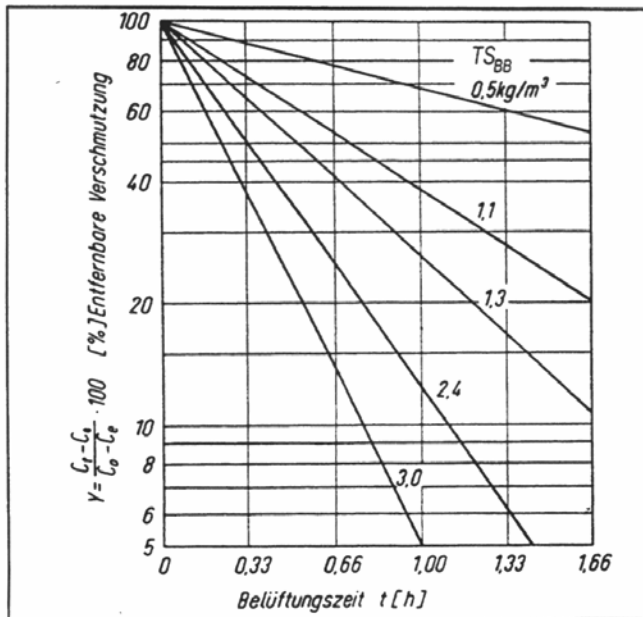


Abbildung 5.3-8: Beispiele für Verlauf der Reinigungsleistung bei kommunalem Abwasser (filtrierte Probe) (aus ATV 1997).

Die Geraden in Abbildung 5.3-8 (im halblogarithmischen Netz) entsprechen der Gleichung

$$\log y = -x \cdot t \quad \text{bzw.} \quad y = 10^{-x \cdot t} \quad \text{Gleichung 5.3-1}$$

x Beiwert  
t Belüftungszeit

$$x = K_1 \cdot TS_{BB} \quad \text{Gleichung 5.3-2}$$

$K_1$  abwasser- und schlammpezifischer Geschwindigkeitsbeiwert (0,4 – 0,7)  
 $TS_{BB}$  Schlamm Trockensubstanz.

$$y = 10^{-K_1 \cdot TS_{BB} \cdot t} \quad \text{Gleichung 5.3-3}$$

Das Produkt  $TS_{BB} \cdot t$  wird als Schlammarbeit bezeichnet.

Der Endwert der  $BSB_5$ -Konzentration nähert sich, der Vorstellung eines Abbaus 1. Ordnung entsprechend, dem 0-Wert. Wird der Verlauf des CSB für den Versuch aus Abbildung 5.3-8 aufgetragen, nähert sich die Konzentration einem Endwert  $>0$ , der dem nicht biologisch abbaubaren Anteil der organischen Kohlenstoffverbindungen entspricht. Dieser Anteil wird als inert bezeichnet und entspricht näherungsweise dem gelösten Rest-CSB in einer gut funktionierenden Kläranlage mit Nitrifikation.

Da im Abwasser auch abbaubare ungelöste Inhaltsstoffe enthalten sind und da auch andere Vorgänge (z.B. Adsorption) zu einer Verringerung der gelösten org. Verschmutzung beitragen, wird der oben gezeigt Verlauf in der Realität nicht beobachtet. Die summierte Wirkung aller Vorgänge und Einflüsse wird anhand der Ergebnisse von Praxisanlagen (mit

unterschiedlichen Belüftungszeiten, Belebtschlamm und Abwässern) in Abbildung 5.3-9 gezeigt. Dass die gezeigten Ergebnisse über weite Bereiche streuen, rührt daher, dass bei dieser Darstellung der Reinigungswirkung über die Belüftungszeit ganz wesentliche Parameter außer Acht gelassen werden (z.B. Abwasser und Schlammzusammensetzung).

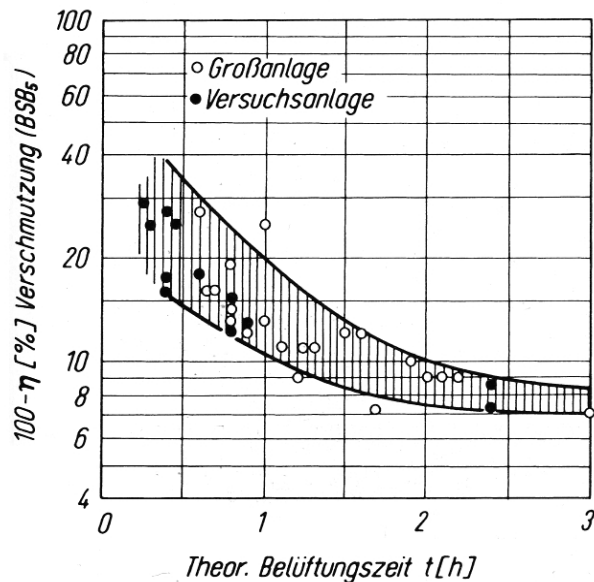


Abbildung 5.3-9: Reinigungswirkung bei vorwiegend häuslichem Abwasser in Abhängigkeit von der Belüftungszeit (Verschmutzung in logarithmischen Maßstab) bei Versuchs- und Großanlagen.

#### – Nährstoffe

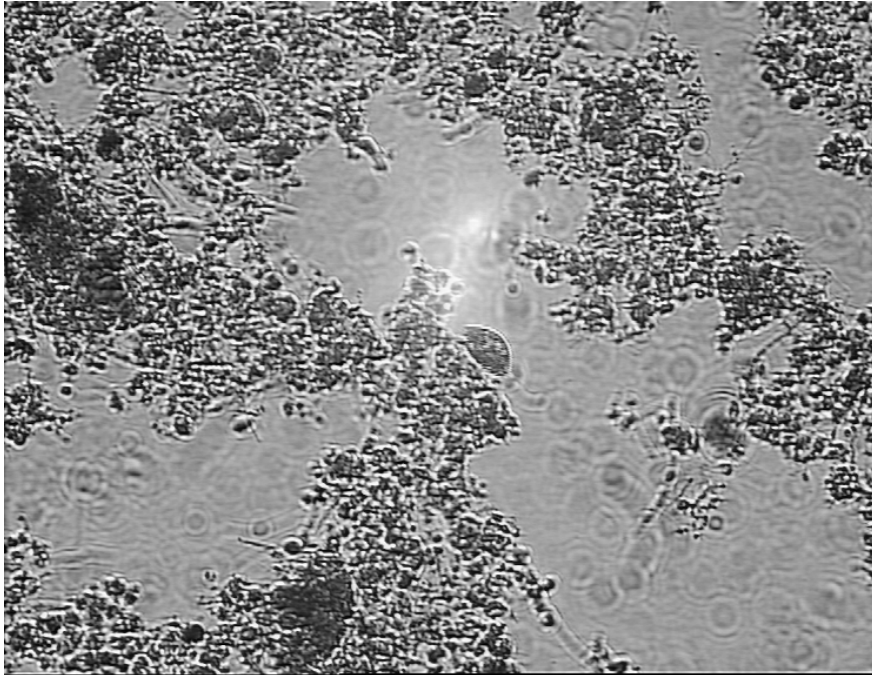
Der erforderliche Gehalt an den Nährstoffen Stickstoff und Phosphor für den Kohlenstoffabbau entspricht den in Abschnitt 5.1.2 genannten 5 bzw. 1% des abgebauten BSB<sub>5</sub>. Liegt die Nährstoffkonzentration darunter (z.B. bei verschiedenen industriellen oder gewerblichen Abwässern), ist eine Reduktion der Abbaugeschwindigkeit zu erwarten.

Die über diesen Anteil hinausgehende Menge an Nährstoffen muss entsprechend den Emissionsverordnungen durch zusätzliche Maßnahmen entfernt werden (Nitrifikation Denitrifikation, Phosphorfällung oder biol. Phosphorelimination; siehe 5.1.4).

**BELEBTSCHLAMM**

- **Trockensubstanz (TS), organische Trockensubstanz (oTS) und aktive Trockensubstanz**

Der Reinigungsträger beim Belebungsverfahren ist im Gegensatz zu den Festbettverfahren in Schwebelagerung befindlicher "Belebtschlamm". Die Zusammensetzung der Schlammflocken variiert in Abhängigkeit vom Grad der Belastung.



*Abbildung 5.3-10:  
Unverdünnte  
Belebtschlammprobe;  
TS ~ 4 g/l (Vergrößerung  
160fach)*

Die Beschreibung des Belebtschlammgehaltes erfolgt über die gesamte Trockensubstanz [g/l], den organische Anteil an der gesamten Trockensubstanz (absolut als [g/l] oder als [%]), bzw. mit gleichen Einheiten über den aktiven Anteil an der gesamten oder organischen Trockensubstanz.

- **Schlammvolumen / Schlammindex**

Der Belebtschlamm soll einerseits möglichst oberflächenreich sein und andererseits ein gutes Absetzverhalten zeigen. Diese gegensätzlichen Anforderungen können in der Praxis nur durch einen Kompromiss erreicht werden.

Beurteilt werden die Absetzeigenschaften durch die Parameter Vergleichsschlammvolumen (VSV) und Schlammindex (ISV):

Das Schlammvolumen ist das spezifische Volumen des Belebtschlammes nach einer bestimmten Absetzzeit (30 min. im Standzylinder) in [ml/l]. Der Schlammindex ist das Volumen, das 1g abgesetzter Schlamm nach 30 min Absetzzeit einnimmt:

$$ISV = \frac{VSV[ml/l]}{TS[g/l]} [ml/g] \quad \text{Gleichung 5.3-4}$$

### – Wachstumsrate / Schlammalter

Die Substratabhängigkeit der aktuellen Wachstumsrate wurde in Abschnitt 5.1.1 dargestellt. Um eine ausreichende Anzahl der gewünschten Mikroorganismen im System halten zu können, muss die Aufenthaltszeit des Schlammes in der Anlage größer sein, als die durch die Wachstumsrate (Nettowachstumsrate = Bruttowachstumsrate - Absterberate) bestimmte Reproduktionszeit. Die Dimensionierung des Belebungsverfahrens ist somit am wesentlichsten durch die spezifische Wachstumsrate beeinflusst.

Als Dimensionierungsparameter wird üblicherweise der reziproke Wert der Wachstumsrate, das Schlammalter, verwendet. Das vorhandene Schlammalter einer Anlage ist daher definiert durch die durchschnittliche Aufenthaltszeit des Belebtschlammes im System.

Wachstumsraten für autotrophe und heterotrophe Mikroorganismen sind in *Tabelle 5.3-1* zusammengestellt.

*Tabelle 5.3-1: Wachstumsraten für autotrophe und heterotrophe Mikroorganismen*

	$\mu_{\max\text{netto}} [d^{-1}]$	$\mu_{\max\text{netto}20^{\circ}\text{C}} [d^{-1}]$	$\mu_{\max\text{netto}10^{\circ}\text{C}} [d^{-1}]$	Literatur
Heterotrophe Mikroorganismen	$6,0 \cdot e^{-0,0693 \cdot (T-20)} - 0,4 \cdot e^{-0,0693 \cdot (T-20)}$	5,60	2,80	ASM 2
Nitrosomonas	$0,47 \cdot 1,103^{(T-15)}$	0,77	0,29	Knowles, 1970; ATV, 1991
	$1,0 \cdot e^{-0,1050 \cdot (T-20)} - 0,15 \cdot e^{-0,1099 \cdot (T-20)}$	0,85	0,30	ASM 2
	$(0,8-0,15) \cdot e^{0,098 \cdot (T-20)}$	0,65	0,24	IAWQ
Nitrobacter	$0,78 \cdot 1,06^{(T-15)}$	1,04	0,58	Knowles, 1970

### – Überschussschlammproduktion

Die Überschussschlammproduktion ist neben Feststoffen im Zulauf von der abgebauten organischen Fracht abhängig. Einflussfaktoren sind unter anderem Schlammalter und Temperatur.

$$\dot{U}S_R = a \cdot \eta B_R - b \cdot TS_R$$

Gleichung 5.3-5

Der Anteil  $a \cdot \eta B_R$  gibt an, wie viel Überschussschlamm durch biochemische Umbauprozesse während des Zellaufbaues gebildet wird, der Teil  $b \cdot TS_R$  die Selbstzehrung des Belebtschlammes durch Zellabbau (Autolyse).  $a=1,1$ ;  $b=0,04$

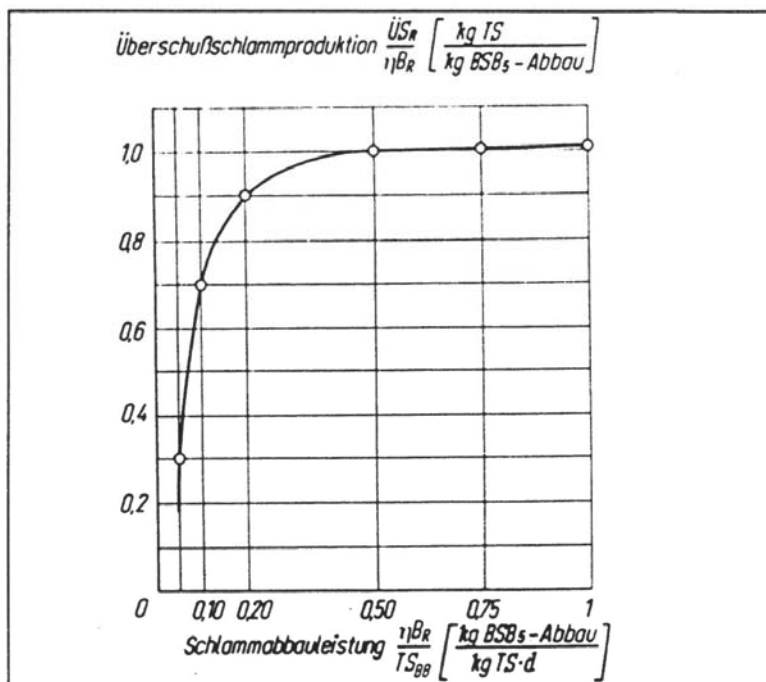


Abbildung 5.3-11:  
Zusammenhang zwischen  
spezifischer  
Überschussschlammproduktion  
(kg  $\dot{U}S$ /kg  $BSB_{5\text{abgebaut}}$ ) und  
spezifischer  
Reinigungsleistung (kg  $BSB_5$   
abgebaut / kg  $TS \cdot d$ ) (aus ATV  
1997).

Der in Abbildung 5.3-11 gezeigte Zusammenhang folgt der aus Gleichung 5.3-5 abgeleiteten Gleichung 5.3-6.

$$\frac{\dot{U}S_R}{\eta B_R} = 1,1 - \frac{0,04 \cdot TS_{BB}}{\eta B_R}$$

Gleichung 5.3-6

und zeigt, dass die Verringerung der spezifischen Überschussschlammmenge durch Selbstzehrung erst ab Schlammabbauleistungen  $<0,3$  deutlich wird. Diese Verringerung ist allerdings mit steigenden spezifischen Sauerstoffverbräuchen (kg  $O_2$ /kg  $BSB_{5\text{-abgebaut}}$ ) verbunden.