

CARL HANSER VERLAG

Karl Schwister

Taschenbuch der Umwelttechnik

3-446-22059-3

www.hanser.de

14 Industrielle Abwasserreinigung

14.1 Aerobe Verfahren

Die im Kapitel 13 beschriebenen biologischen Reinigungsverfahren sind mit der dort angewendeten Bauweise für die hoch belasteten Industrieabwässer nur bedingt einsetzbar. Nachteilig sind z. B.:

- großer Flächenbedarf und großes Reaktionsvolumen
- energetisch aufwändige O_2 -Versorgung bei schlechter Ausnutzung des eingetragenen Sauerstoffs
- Geruchsbildung bei offener Bauweise
- Anfall großer Mengen an Überschussschlamm
- geringer Abbau von langlebigen (persistenten) Schadstoffen

Steigende Anforderungen an den Umweltschutz haben in den letzten Jahren wichtige Fortschritte bei der Behandlung industrieller Abwässer gebracht. Diese Entwicklung kann in zwei Bereiche unterteilt werden:

- Verringerung des Platzbedarfs durch Hochbauweise und Optimierung der Sauerstoffnutzung
- Erhöhung der spezifischen Abbauleistung der Mikroorganismen

14.1.1 Blasensäulenreaktor

Blasensäulenreaktoren finden auf Grund ihrer einfachen Bauweise nicht nur in der chemischen Industrie Anwendung, sondern werden auch für die Abwasserreinigung eingesetzt.

Mit dem **Biohochreaktor** (Hoechst), der **Turbibiologie** (Bayer) oder der **Abwasserreinigung in Tanks** (Lurgi) sind Neuentwicklungen gelungen, die besonders für industrielle Abwässer geeignet sind. Die Konzepte der Hochbiologie-Varianten unterscheiden sich nur unwesentlich voneinander und bieten u. a. folgende Vorteile:

- **geringerer Grundflächenbedarf** gegenüber der Flachbauweise (Bauhöhe: 10–30 m)
- zusätzliche Flächeneinsparung durch eine in der Höhe angeordnete ringförmige Nachklärung (vgl. Bild 14-1)
- **effiziente O_2 -Ausnutzung** durch Tiefenbelüftung
- **Gerüche und Lärmerzeugung** werden durch die geschlossene und kompakte Bauweise erheblich reduziert
- **einfache Wartung** durch das Fehlen bewegter Teile unter Wasser

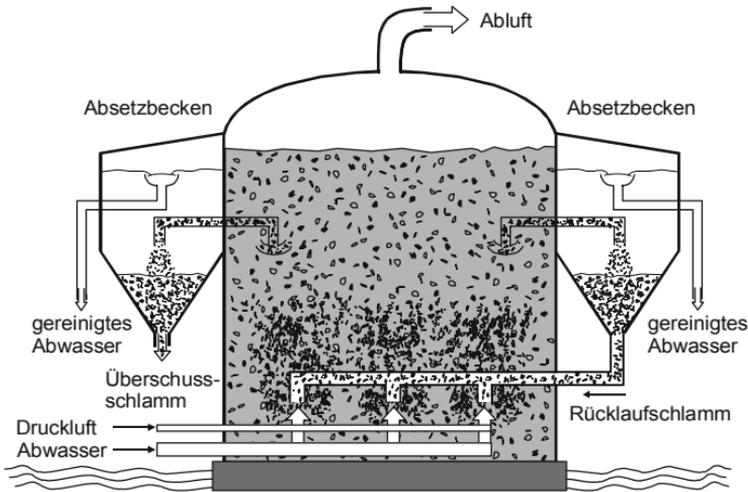


Bild 14-1: Biohochreaktor der Firma Hoechst [14.1]

Der **Biohochreaktor** unterscheidet sich von der **Bayer-Turbibiologie** durch die Verwendung einer Radialstromdüse als Begasungssystem und durch die Verwendung von Leitrohren zur Schaffung besserer Strömungsbedingungen (vgl. Bild 14-1 und 14-2). Die Radialstromdüse hat die Aufgabe, Luft mit Hilfe eines Wasserstrahls (Zweistoffdüse) in feine

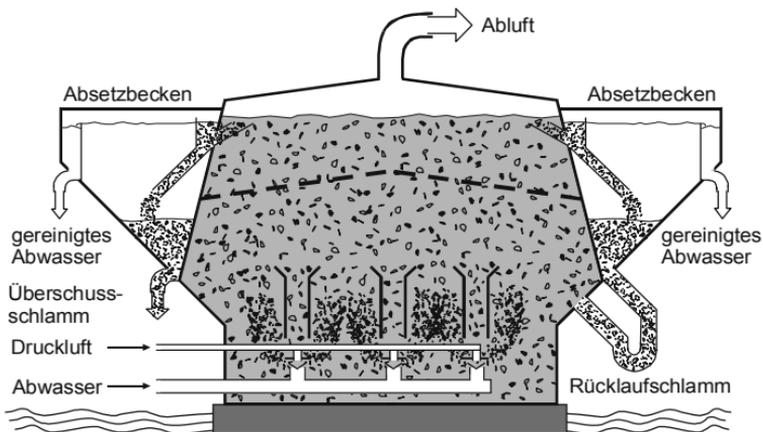


Bild 14-2: Turmbiologie der Firma Bayer [14.1]

Blasen zu zerteilen und anschließend durch Leitvorrichtungen radial in das zu begasende Abwasser zu verteilen.

Nach oben wird der Reaktionsraum durch eine Lochplatte von dem darüber liegenden Entgasungsraum abgetrennt. Das gereinigte Abwasser fließt nach außen in die ringförmig angeordnete Nachklärung, in der die Schlammabtrennung stattfindet. Die Systeme sind in ihrer Leistung (z. B. Sauerstofftrag) weit gehend vergleichbar. Beide Reaktoren werden technisch angewendet, wobei die größten Reaktoren ein Reaktionsvolumen von ca. 20 000 m³ bei einem Abwasserdurchsatz von ca. 60 000 m³/d haben. Auf der Basis einer Schadstofffracht von 30 t BSB₅/d kann eine **Raumbelastung** von 0,9 kg BSB₅/(m³ · d) und eine **mittlere Verweilzeit** von 8 h berechnet werden. Beide Kenngrößen liegen in der gleichen Größenordnung wie bei einer kommunalen Kläranlage mit Belebungsbecken.

14.1.2 Schlaufenreaktor

Schlaufenreaktoren bestehen aus einem zylindrischen Behälter mit einem Höhe/Durchmesser-Verhältnis von 5 zu 7. In dem Behälter befindet sich ein beidseitiges offenes Rohr, dem von unten oder oben über eine Zweistoffdüse Abwasser und Luft zugeführt werden (vgl. Bild 14-3). Der mit Flüssigkeit und Gas eingetragene Impuls sorgt für eine intensive Vermischung im Bereich der Düse sowie eine ausgeprägte Schlaufenströmung um das Innenrohr.

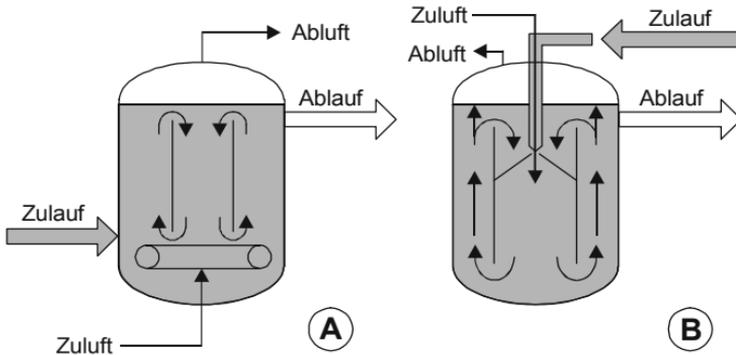


Bild 14-3: Schematische Darstellung eines Schlaufenreaktors: (A) Zufuhr der Luft/Flüssigkeit von unten, (B) Zufuhr der Luft/Flüssigkeit über eine Zweistoffdüse von oben

Bei der Maßstabsvergrößerung bereiten Schlaufenreaktoren wegen definierter Strömungsführung weniger Probleme als andere Reaktoren. In der Praxis werden daher auch Schlaufenreaktoren mit einem Durchmesser von bis zu 7 m und einer Höhe von bis zu 60 m eingesetzt.

Zur aeroben Abwasserreinigung werden von den Schlaufenreaktoren im industriellen Maßstab bisher nur der ICI-DEEP-SHAFT-Reaktor [14.2] und der Hochleistungs-Compakt-Reaktor (HCR) der Firma Otto Oeko Tech [14.3] eingesetzt.

Beim **DEEP-SHAFT-Verfahren** ist der Belebungsbeckenraum als Schacht von 50–150 m Tiefe mit einem zylindrischen Innenrohr ausgeführt. Das oberirdisch abgeschlossene Kopfbecken dient der Entgasung (vgl. Bild 14-4). Das Abwasser wird im Innenrohr (Downcomer) nach unten geführt und fließt im äußeren Rohr (Riser) wieder hoch. Die Wasserbewegung wird dabei wie beim **Airlift-Verfahren** durch den Auftrieb erzeugt, der aus der Luftzugabe resultiert. Der hohe O_2 -Druck und die lange O_2 -Verweilzeit im Reaktor tragen zu einer guten Sauerstoffausnutzung bei. Nach einer Startbelüftung im Riser erfolgt die Betriebsblüfung im Downcomer auf etwa 1/3 der Beckentiefe.

Vorteile des DEEP-SHAFT-Verfahrens im Vergleich zu konventionellen Kläranlagen sind:

- sehr geringer Platzbedarf,
- geringer Energiebedarf wegen guter O_2 -Ausnutzung,
- keine Auskühlung des Abwassers.

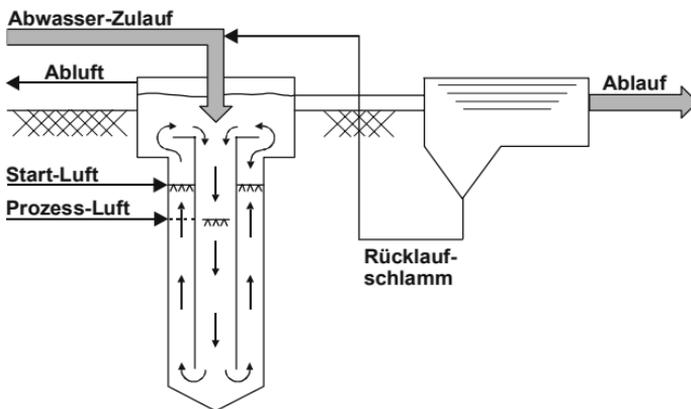


Bild 14-4: DEEP-SHAFT-Verfahren (ICI) [14.2]

Nachteilig ist die eingeschränkte Anwendbarkeit in Abhängigkeit von der Ablaufuntergrundbeschaffenheit.

Der **Hochleistungs-Kompakt-Reaktor** stellt eine Variante des Schlaufenreaktors dar, wie sie schematisch bereits in Bild 14-3B gezeigt ist. Über eine Zweistoffdüse wird Abwasser/Schlamm-Luft eingetragen und im System sehr fein dispergiert. Das Dreistoff-Gemisch wird mit hoher Geschwindigkeit in den Reaktor gefördert, sodass über das Innenrohr der Düse gleichzeitig Luft angesaugt wird. Der erzeugte Freistrahл bewirkt eine Umwälzung des Reaktorinhalts um das Innenrohr, sodass eine Schlaufenströmung entsteht [14.3].

Da die Oberfläche der Biomasse bei Schlaufenreaktoren gegenüber konventionellen Verfahren um ein Vielfaches größer ist, können Schadstoffe und auch Sauerstoff durch einen verbesserten Stoffübergang schneller zu den Mikroorganismen transportiert werden. Dies hat hohe Abbauleistungen mit bis zu 100 kg BSB₅/(m³ · d) zur Folge sowie eine weitere Reduzierung der Überschussschlammproduktion.

14.1.3 Festbettreaktoren

Bereits seit über 100 Jahren werden Festbettreaktoren als **Tropfkörper** für die Reinigung schwach belasteter kommunaler Abwässer eingesetzt. Auf der Oberfläche des im Festbettreaktor befindlichen Füllkörpermaterials bildet sich ein biologischer Rasen aus, sodass Mikroorganismen im Reaktor zurückgehalten werden. Als Füllkörpermaterial dienen poröse Träger oder Kunststoffpackungen mit einer volumenspezifischen Oberfläche von bis zu 250 m²/m³.

Besonders für die Behandlung **von schwer abbaubaren Abwasserinhaltsstoffen** eignen sich Festbettreaktoren, da die Schadstoffe am Biorasen so lange adsorbiert werden, bis sie biologisch abgebaut sind. Unter diesen Voraussetzungen können solche Systeme Aktivkohlefilter ersetzen mit dem großen Vorteil, dass das **Adsorbens** wegen der mikrobiologischen Aktivität kaum regeneriert werden muss.

14.2 Anaerobe Verfahren

Anaerobe Abwasserbehandlungsanlagen haben in der jüngsten Vergangenheit eine erhebliche Entwicklung erfahren, insbesondere weil sie sich zur Behandlung von organisch hoch belasteten Industrieabwässern eignen. Weiterhin bieten sie den Vorteil der **Energiegewinnung** durch das

entstehende Biogas. In der Bundesrepublik gibt es zurzeit (1998) ca. 130 großtechnische Anwendungen. Die Einsatzbereiche beschränken sich bisher auf hoch belastete Abwässer (CSB: 3–40 g/l) aus der Nahrungsmittel- und Papierindustrie sowie Tierkörperverwertungsanstalten.

Die anaeroben Verfahren haben gegenüber aeroben Verfahren folgende **Vorteile**:

- Anaerobe Prozesse erfolgen unter O₂-Ausschluss, sodass der Energiebedarf (Beschickungspumpen und Umwälzung) geringer ist.
- Es entsteht verwertbares Biogas mit einem Heizwert von 7–9 kWh/m³ (60–80 % Methananteil).
- Die spezifische Überschussschlammproduktion ist um den Faktor 3–10 niedriger als bei den aeroben Verfahren (Aufwendungen für die Beseitigung von Schlamm sind geringer).
- Manche aerob nicht abbaubaren Stoffe können anaerob abgebaut werden.
- Anaerobverfahren eignen sich besonders für Kampagnebetriebe (z. B. Fruchtsaftindustrie), da die Biomasse auch nach längerer Ruhepause in wenigen Tagen wieder aktiv ist.

Nachteilig sind:

- Der CSB-Wirkungsgrad liegt in der Regel bei 70–80 %, d. h., eine aerobe Nachbehandlung ist häufig erforderlich.
- Anaerobsysteme sind gegenüber Temperatur-, pH-, Konzentrations- und Belastungsschwankungen empfindlicher als aerobe Systeme.

14.2.1 Mikrobiologische Besonderheiten

Der Belebtschlamm bei der aeroben Abwasserreinigung besteht aus sehr vielen Bakterienarten (**Mischbiozönose**). Jede einzelne dieser Bakterienarten baut die organischen Schadstoffe in die mikrobiologischen Endprodukte CO₂ und H₂O und eigene Biomasse um.

Im Unterschied dazu werden bei der anaeroben Abwasserreinigung die organischen Schadstoffe größtenteils nacheinander von verschiedenen Bakterienarten bis zu den Endprodukten CH₄, CO₂, H₂S (Biogas) und Biomasse umgebaut. Der anaerobe Abbau verläuft in vier Stufen (vgl. Bild 14-5) und lässt sich wie folgt beschreiben.

■ **Hydrolyse-Phase**

Die häufig schwer löslichen makromolekularen Substrate werden durch Enzyme in kleinere lösliche Moleküle (Zucker, Aminosäuren, Fettsäuren) überführt. Dieser Schritt erfolgt sehr langsam.

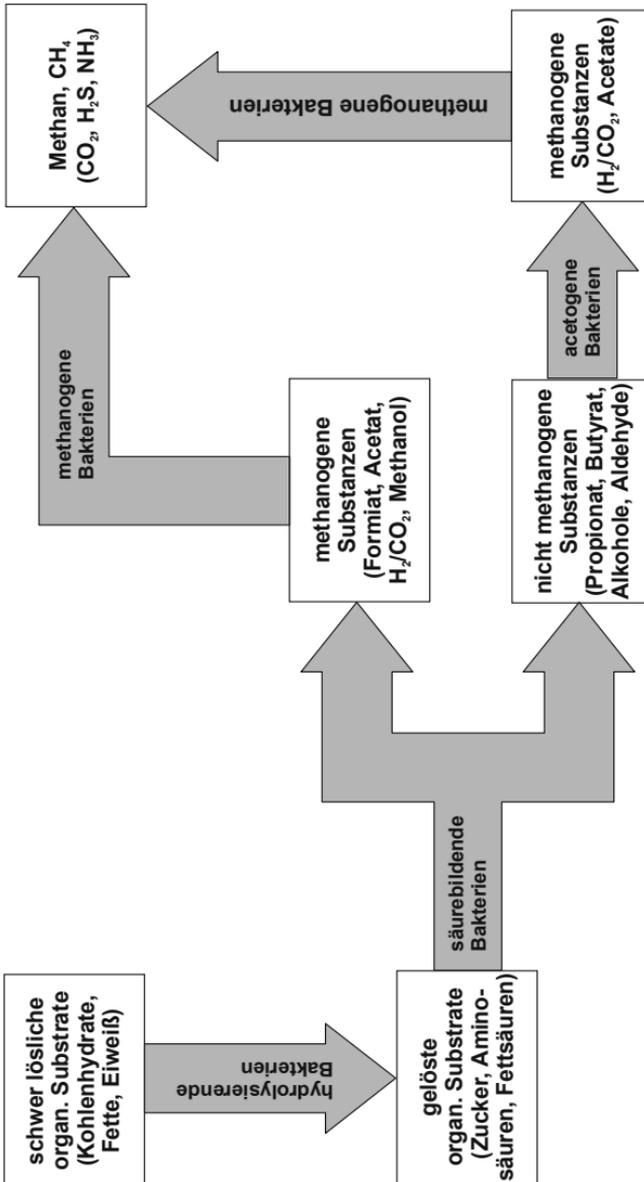


Bild 14-5: Anaerober Abbau organischer Substanzen

■ Versäuerungs-Phase

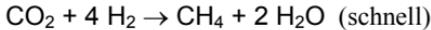
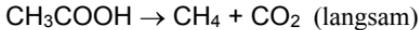
Während der acidogenen Phase entstehen durch fakultative Anaerobier, bei relativ konstantem CSB-Wert des Abwassers, geruchsintensive kurzkettige organische Säuren (Essigsäure, Propionsäure, Buttersäure, Valeriansäure) sowie Alkohole (Methanol, Ethanol) und in der Gasphase H_2/CO_2 . Von diesen Zwischenprodukten können die Methanbakterien jedoch nur Essigsäure (langsam) und H_2/CO_2 (sehr schnell) zu Methan umsetzen.

■ Acetogene Phase

Es werden Propion- und Buttersäure sowie Alkohole in dieser Phase zu Essigsäure umgebaut. Dies kann jedoch nur bei geringem Wasserstoffpartialdruck geschehen. Die nachfolgende Bildung von Methan führt durch H_2 -Verbrauch zu einem konstant niedrigen H_2 -Partialdruck.

■ Methanogene Phase

Die Methanbildung erfolgt vereinfacht nach folgenden Gleichungen:



Da die methanogenen Bakterien vergleichsweise langsam wachsen (Generationszeit: 30 Tage) und empfindlich gegenüber Milieuänderungen sind, bestimmen sie häufig den Wirkungsgrad und die Stabilität einer anaeroben Abwasserreinigungsanlage.

Je nach Schadstoffart stellt eine der Abbaustufen den geschwindigkeitsbestimmenden Schritt dar. Bei feststoffreichen Abwässern ist dies häufig die Hydrolyse, während bei einer anderen Abwasserzusammensetzung die acetogene oder methanogene Phase geschwindigkeitsbestimmend sein kann.

14.2.2 Verfahrenstechnische Aspekte

Methanogene Bakterien können, auch gemeinsam mit acetogenen Bakterien, nur niedermolekulare organische Säuren, CO_2/H_2 und Methanol als Substrat verwerten. Somit stellt die Hydrolyse und Versäuerung der Abwasserinhaltsstoffe die entscheidende Vorraussetzung für einen hohen Wirkungsgrad der anaeroben Reinigung dar. Es ist jedoch unabhängig davon, ob Hydrolyse und Versäuerung räumlich von der Methanstufe getrennt werden (**2-stufiges Verfahren**) oder ob nur ein Reaktor ver-

wendet wird (**1-stufiges Verfahren**). In Bild 14-6 sind die Verfahrensschemata beider Reinigungsverfahren gezeigt.

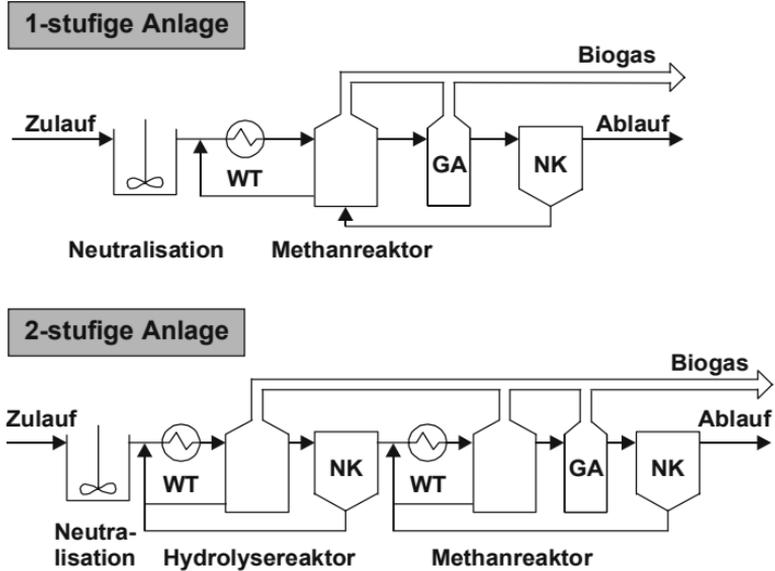


Bild 14-6: Verfahrensschemata von 1- und 2-stufigen anaeroben Abwasserreinigungsverfahren (WT Wärmetauscher, GA Gasabscheider, NK Nachklärung)

In der Vergangenheit wurden wegen der einfachen und damit kostengünstigen Ausführung die 1-stufigen Anlagen bevorzugt. Die Voraussetzung hierfür ist, dass der Hydrolyseschritt schnell und die Essigsäure/Methan-Bildung langsam verläuft. Die Nachteile einer 1-stufigen Anlage sind:

- erhöhte Störanfälligkeit,
- geringere Abbauraten.

Substratbedingte Schwankungen und Störungen können durch ein Ausgleichsbecken aufgefangen werden.

Verläuft der Hydrolyseschritt dagegen langsam und ist damit geschwindigkeitsbestimmend, sollte die Anlage ohnehin 2-stufig ausgelegt werden. Betriebssicherheit, Stoffumsatz, Biogasertrag und auch -qualität sind bei 2-stufigen Anlagen generell besser als bei 1-stufigen. Bei hohen

CSB-Belastungen ($> 3 \text{ g/l}$) liegen die Abbauleistungen bei 85–90 %, sodass der anaerobe Abbau als alleiniges Verfahren noch keine Direkt-einleiterqualität liefert. Zusammengefasst ergeben sich folgende Aspekte von 2-stufigen Anlagen:

- höhere Investitions- und Betriebskosten
- erhebliche Reduzierung des Reaktorvolumens
- keine Vorteile der zweistufigen Ausführung bei problematischen Abwässern (z. B. schwer hydrolysierbares und stark gepuffertes Abwasser)

Für die verfahrenstechnische Auslegung von Anaerobverfahren kann nicht im Vorfeld festgelegt werden, welcher Reaktortyp (z. B. Rührreaktor, Festbettreaktor, Fließbettreaktor) der effizienteste für die jeweilige Anwendung ist. Vergleichende Untersuchungen der verschiedenen Reaktortypen führen bei unterschiedlichen Abwässern zu unterschiedlichen Ergebnissen [14.4]. Die Auslegung einer anaeroben Abwasserreinigung erfolgt auf der Grundlage von halbtechnischen Versuchen oder in Anlehnung an eine bestehende Großanlage mit vergleichbaren Randbedingungen, wobei die Durchführung vor Ort immer dem Vorzug zu geben ist.