

Reaktionstechnische Optimierung und Maßstabsvergrößerung von anaeroben Festbett-Umlauf- und Wirbelschichtreaktoren*

Alexander Aivasidis und Christian Wandrey**

Durch die Entwicklung der Produktionstechniken fallen z.T. örtlich konzentriert organisch hochbelastete Abwässer an. Dieser Aspekt muß auch bei der Entsorgungstechnik hinreichend berücksichtigt werden. Ziel des entwickelten „Biogas-Hochleistungsverfahrens“ war es daher auch, für organisch hochbelastete Abwässer eine technisch ausgereifte Lösung bereitzustellen [1].

Die Maßstabsvergrößerung von 1 l bis auf 300 m³ am Beispiel der Behandlung von Kartoffelstärkeabwasser bereitete keine Probleme [2]. Durchweg wurden im jeweils größeren Maßstab leicht verbesserte Prozeßdaten ermittelt. Parallel zur Entwicklung der Festbettetechnik wurde in den vergangenen Jahren auch ein Wirbelschichtkonzept verfolgt. Da es in herkömmlichen Wirbelschichtreaktoren [3] bei Verwendung von Trägerteilchen, bei denen nur die äußere Oberfläche zur Adsorption von Biomasse dient, leicht zum Verlust von Biomasse durch Abrieb aufgrund nicht vermeidbarer Scherkräfte kommt, ist auch bei diesem Konzept ein definiertes makroporöses Trägermaterial wie Siran, welches dreidimensional von Mikroorganismen kolonisiert werden kann, Materialien, die nur oberflächlich besiedelt werden, weit überlegen.

Während bei herkömmlichen Schwachlast-Biogasanlagen die Abgabe des gebildeten Biogases an keiner Stelle als Problem angesehen wird, übertreffen die beim Biogas-Hochleistungsverfahren auch unter praktischen Bedingungen erzielten CSB-Umsatzraten die höchsten Literaturangaben um bis zu einen Faktor 10, so daß technische Grenzen für die pro Reaktorvolumen und Zeiteinheit gebildete und freizusetzende Biogasmenge erreicht werden. Es erscheint daher plausibel, daß eine maximale sinnvolle Bauhöhe existieren muß, oberhalb derjenigen das gebildete Biogas nicht mehr durch den verfügbaren freien Querschnitt abgeführt werden kann.

1 Maßstabsvergrößerung in der Verfahrenstechnik

Bislang existieren in der Literatur keine Angaben zur Maßstabsvergrößerung bzw. Dimensionierung von Anaerobreaktoren mit integrierten Maßnahmen für die Biomasse-Rückhaltung (z.B. UASB-Reaktoren, Festbett- und Wirbelschichtreaktoren). Von der Wirbelschichttechnik abgesehen handelt es sich in allen Fällen durchweg um verhältnismäßig flach gebaute Anlagen mit einem H/D -Verhältnis von ≤ 1 , deren auslegungsgemäße Raum-Zeit-Ausbeute maximal 15 kg CSB/(m³ d) beträgt.

Für die Maßstabsvergrößerung in der chemischen Verfahrenstechnik stehen im wesentlichen zwei Methoden zur Verfügung. Es handelt sich hierbei um eine Maßstabsübertragung auf der Basis der Ähnlichkeits-Theorie sowie der auf ihr beruhenden Modelltheorie. Ist es unvermeidbar, daß bei der Maßstabsvergrößerung Änderungen von Prozeßparametern (z.B. Fluidgeschwindigkeiten) und geometrischen Parametern (z.B. Verhältnis von Fläche zu

Volumeneinheit) in der großtechnischen Anlage gegenüber dem Laborreaktor auftreten, so führt die Modellnäherung zu einer genaueren Vorhersage der zu erwartenden Unterschiede und wurde auch daher für die vorliegende Dimensionierungsproblematik herangezogen.

2 Dimensionierung von anaeroben Festbett-Umlauf- und Wirbelschichtreaktoren

Anaerobe Festbett-Umlauf- und Wirbelschichtreaktoren verhalten sich reaktionstechnisch betrachtet nahezu wie ein gut durchmischter, kontinuierlich betriebener Rührkesselreaktor unter Auslaufbedingungen. Daraus resultiert ein über die Reaktorhöhe konstanter Quellterm des gebildeten Produktes. Da dieses allerdings ein schlecht wasserlösliches Gasmisch (CH₄/CO₂) ist, kommt es zu einer höhenabhängigen linearen Gasakkumulation mit zunehmender Bauhöhe. Gleichzeitig ändert sich auch in der gleichen Richtung der relative Gasgehalt in der Flüssigkeit, ausgehend von fast Null in Höhe des Reaktoreintritts bis hin zu einem Maximalwert in Höhe der Drei-Phasen-Grenzschicht fest/flüssig/gasförmig.

Ein Ansatz zur Beschreibung dieser Verhältnisse ist durch Heranziehen einer prozeßbedingten Einflußgröße möglich, welche die diskutierten Gesichtspunkte hinreichend berücksichtigt. Als solche konnte die sogenannte flächenbezogene Gasbelastung (FBGB) in der Dimension m³/(m² h) identifiziert werden. Die flächenbezogene Gasbelastung ändert sich linear mit zunehmender Säulenhöhe und erreicht einen die weitere Biogasabgabe limitierenden oberen Wert, der dann auch zwangsläufig die maximal zulässige Bauhöhe determiniert.

Aus Experimenten an Festbett-Umlaufreaktoren (7- und 25-mm Siran-Raschig-Ringe sowie 32 bis 50 mm dicke Klumpen aus gebrochener Lavaschlacke) und Wirbelschichtreaktoren (Siran-Kugeln mit einem Durchmesser von 1 bis 2 mm) wurden die korrespondierenden Maximalwerte der flächenbezogenen Gasbelastung (FBGB_{max}) durch Betrachtung des Gas-Hold-up ermittelt.

Mit Hilfe der auf diese Weise gewonnenen Grenzwerte kann dann die Reaktordimensionierung auf der Grundlage der folgenden Vorgehensweise vorgenommen werden. Zunächst wird aufgrund der bekannten bzw. analytisch zugänglichen Abwasserkenndaten die Anlagenfahrweise festgelegt. Unter Berücksichtigung von Spezifikations-Eckdaten hinsichtlich der Reinigungsleistung der Anaerobanlage werden anschließend durch reaktionstechnische Untersuchungen im Labor- und Pilotmaßstab belastbare Leistungsdaten in bezug auf die Auslegung der großtechnischen Anlage gewonnen.

Aus dem zu erwartenden Abwasserdurchsatz und der ermittelten Verweilzeit resultiert zunächst das erforderliche Volumen V_R der zu realisierenden Methanisierungsstufe, deren Höhe und Durchmesser noch zu identifizieren sind. Danach wird gemäß der Vorstellung der zugrundegelegten Modelltheorie aus dem Reaktorzylinder ein durchgehendes Volumenelement V_S mit einem Volumen von 1 m³ herausgegriffen (Abb. 1). Da die volumenspezifische Biogasbildung aus der CSB-Raum-Zeit-Ausbeute bzw. entsprechenden Abgas-mengenmessungen bekannt ist und das gewählte Segmentvolumen 1 m³ beträgt, ergibt sich die Querschnittfläche A_S des differentiellen Volumenelementes V_S und daraus die maximal zulässige Bauhöhe.

Im unteren Teil von Abb. 1 ist die Abhängigkeit der pro Volumeneinheit bezogenen (spezifischen) Fläche von der auslegungsgemäß vorgegebenen volumenspezifischen Biogasbildung für die disku-

* Poster auf dem Jahrestreffen der Verfahrens-Ingenieure, 25. bis 27. Sept. 1991 in Köln.

** Dr. A. Aivasidis und Prof. Dr. C. Wandrey, Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Biotechnologie 2, 5170 Jülich.

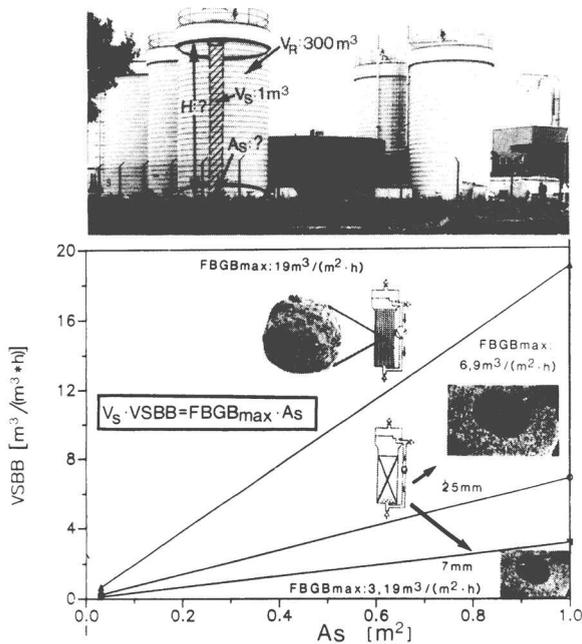


Abb. 1. Vorgehensweise zur Dimensionierung trägerhaltiger Anaerobreaktoren (Festbett-Umlauf- und Wirbelschichtreaktor) auf der Grundlage der maximalen flächenbezogenen Gasbelastung.

tierten Reaktorkonfigurationen am Beispiel der Verwendung von Siran-Trägern dargestellt. Bei Verwendung von Trägerpartikeln $> 25 \text{ mm}$ lassen sich innerhalb eines praxisrelevanten Bereiches der volumenspezifischen Biogasbildung ohne weiteres sinnvolle Bauhöhen von 8 bis 14 m realisieren, was anhand von Dimensionierungsbeispielen von praktisch ausgeführten Festbett-Umlaufreaktoren bis zu einem Nutzvolumen von 300 m^3 bestätigt wurde.

3 Reaktionstechnische Konsequenzen aus dem Einfluß der Verweilzeitverteilung auf die mikrobielle Abbaukinetik

Anhand entsprechender Untersuchungen zur Prozeßauslegung bei der anaeroben Reinigung komplex zusammengesetzter Abwässer durch Gegenüberstellung von ein- und zweistufiger Fahrweise konnte in der Vergangenheit die eindeutige Überlegenheit einer zweistufigen Prozeßführung dokumentiert werden. Im folgenden geht es insbesondere um die Erfassung des Einflusses der Verweilzeitverteilung auf den mikrobiellen Abbau durch Realisierung einer Kaskade in der Methanisierung.

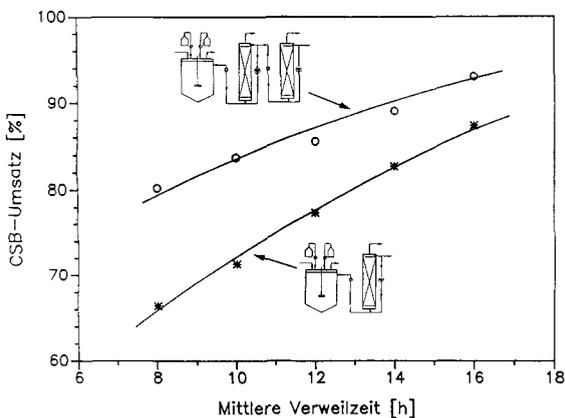


Abb. 2. Änderung des CSB-Umsatzes in Abhängigkeit von der Verweilzeit bei der anaeroben Behandlung von Brennereischlempen; Zweistufen-Prozeß mit und ohne Kaskadenschaltung.

Die Untersuchungen wurden am Beispiel eines Abwassers aus der Sauerkrautherstellung sowie der Alkoholbrennerei mit CSB-Werten von jeweils 20 und 32 kg/m^3 , stellvertretend für hochbelastete, komplex zusammengesetzte Medien, vorgenommen. Die CSB-Ablaufwerte der Kaskade lagen in allen Fällen deutlich unterhalb der Ablaufdaten des Prozesses mit einstufiger Methanisierung. Die eindeutige Überlegung der Prozeßvariante mit zweistufiger Kaskade in der Methanisierung gegenüber derjenigen mit einem Festbett-Umlaufreaktor wird insbesondere anhand der Kurvenverläufe für den Umsatz (Abb. 2) in Abhängigkeit von der Verweilzeit besonders hervorgehoben. Die daraus resultierende Volumenreduzierung in der Methanisierungskaskade gegenüber der herkömmlichen Betriebsweise beträgt für eine CSB-Reduktion von 80% ca. 40%.

4 Ausblick

Die vorliegenden Ergebnisse belegen eindeutig, daß ein herkömmlicher Zweistufen-Prozeß mit zwei voneinander völlig verschiedenen mikrobiellen Biozönosen dadurch weiter optimiert werden kann, daß die Methanisierung als zweistufige Kaskade mit weitgehend identischem Populationspektrum ausgelegt wird.

Faßt man an dieser Stelle die Ergebnisse aller bisheriger reaktionstechnischer Untersuchungen zur Prozeßauslegung/-optimierung bei der anaeroben Behandlung organisch hochbelasteter Abläufe aus dem Bereich der Lebensmittelindustrie in Festbett-Umlaufreaktoren zusammen, so ergibt sich der in Abb. 3 dargestellte Verlauf

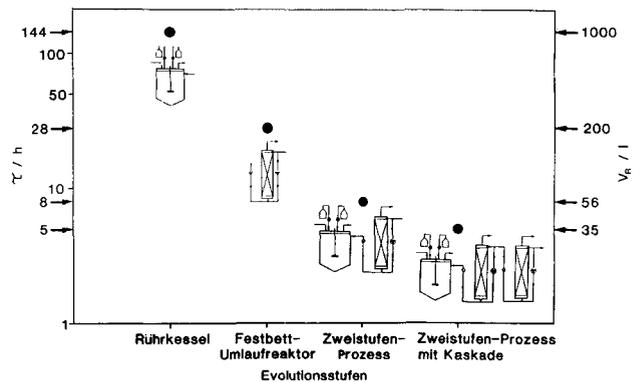


Abb. 3. Entwicklung der minimalen Verweilzeit und des relativen Methanisierungsvolumens für 85% CSB-Reduktion bei der anaeroben Behandlung von komplex zusammengesetzten Abläufen der Nahrungsmittelindustrie.

der minimalen Verweilzeit und des relativen erforderlichen Methanisierungsvolumens für eine CSB-Reduktion von ca. 85% bei den verschiedenen Entwicklungsstufen der „Verfahrens-Evolution“. Demnach beträgt das Volumen einer zweistufigen Kaskade nur noch 3,5% des für einen kontinuierlich betriebenen Rührkesselreaktor ohne Maßnahmen der Verweilzeitentkopplung erforderlichen Volumens.

Eingegangen am 29. Oktober 1991

- [1] Aivasidis, A.; Wandrey, Ch.: Korrespondenz Abwasser 35 (1988) Nr. 3, S. 216/230.
- [2] Schraewer, R.: Stärke 8 (1988).
- [3] Heijnen, J. J.; Enger, W. A.; Mulder, A.; Lourens, P. A.; Keijzers, A. A.; Holks, F.: Gas Wasserfach, Wasser Abwasser 126 (1985) Nr. 2, S. 81/87.

Schlüsselwörter: Reaktionstechnik, Optimierung, Scale-up, Reaktoren.

Das vollständige Manuskript dieser Arbeit umfaßt 30 Seiten mit 11 Abbildungen und 20 Literaturzitaten. Es ist als Fotokopie oder Mikrofiche MS 2033/92 erhältlich.