



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

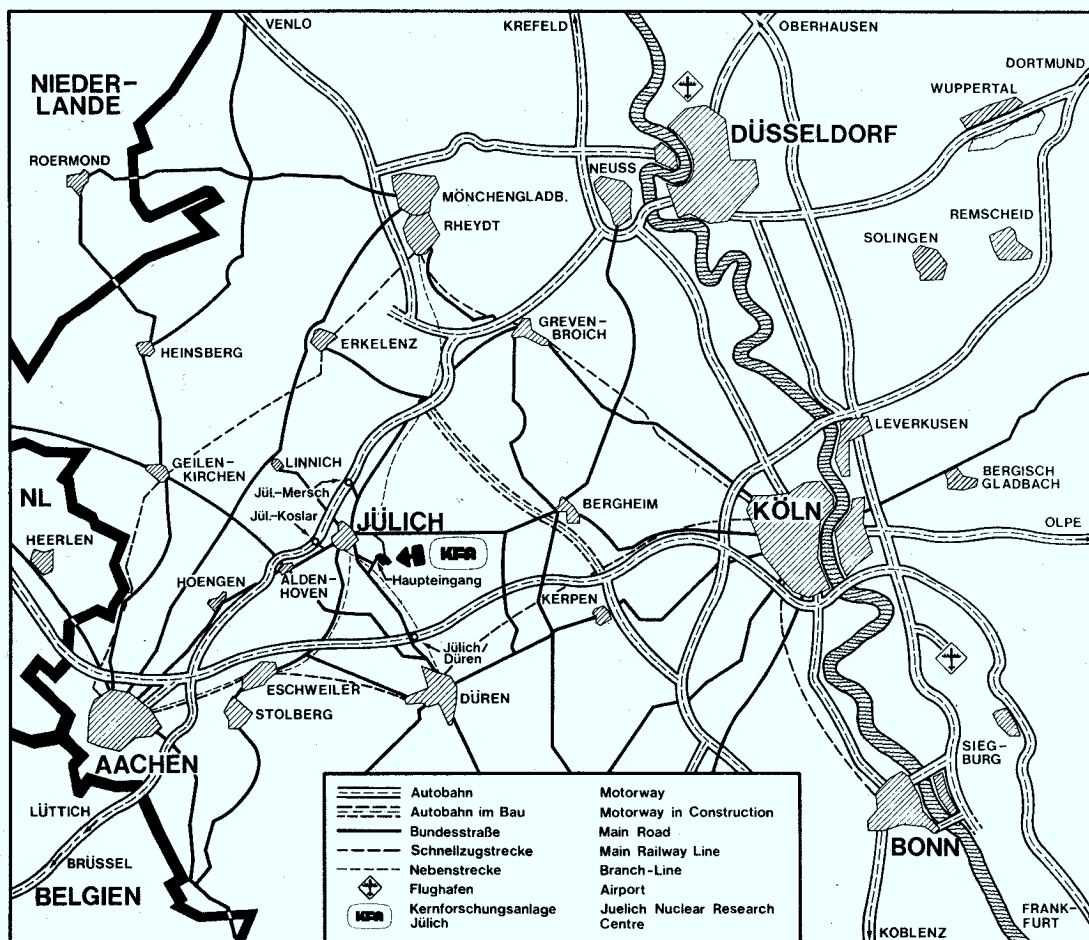
Institut für Biotechnologie 2

**Ein „Glasschwamm“ als Bakterienspeicher –
Abwasserreinigung ohne Sauerstoff**

von

A. Aivasidis und C. Wandrey

**Jül - 1900
März 1984
ISSN 0366-0885**



Als Manuskript gedruckt

Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 1900

Institut für Biotechnologie 2 Jül – 1900

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)

Telefon: 024 61/610 · Telex: 833556-0 kf d

Ein „Glasschwamm“ als Bakterienspeicher – Abwasserreinigung ohne Sauerstoff

von

A. Aivasidis und C. Wandrey

Abstract:

There are a large number of advantages in using microbial anaerobic degradation processes in waste water pretreatment. A disadvantage of this method lies in the relative large doubling times of anaerobic microorganisms. Because of the autocatalytic behaviour of the microbial processes and the low carbon incorporation rate which results in low biomass concentrations in continuously operated systems, decoupling of residence times for substrate and biomass is necessary. In this way high space time yields can be achieved under anaerobic conditions as well. From the well known variants for biomass retention, immobilisation by an inert support is thought to be an effective alternative. Experiments on anaerobic treatment of sulfite evaporator condensate by means of immobilized microorganisms were carried out in a 12 l-fixed bed loop reactor. Porous sinter glass from SCHOTT Mainz with a porosity of about 60% and a mean pore diameter of 60-100 μm served as carrier. The reactor was operated for several months under steady state conditions at different residence times using an iterative approach. At a residence time of 12 h 84% of the chemical oxygen demand (COD) was eliminated at loading rates up to 88 kg COD/m³ and day.

Zusammenfassung:

Eine Reihe von Vorteilen spricht überzeugend für den Einsatz von mikrobiellen anaeroben Abbauprozessen zur Vorbehandlung von organisch stark verschmutzten Abwässern. Ein Nachteil dieser Methode liegt allerdings in den relativ langen Generationszeiten der anaeroben Mikroorganismen. Aufgrund des autokatalytischen Verhaltens mikrobieller Prozesse und der niedrigen Biomassekonzentrationen im kontinuierlich betriebenen Rührkessel-Reaktor durch eine geringe Inkorporationsrate ist eine Entkopplung der Verweilzeiten für Substrat und Biomasse erforderlich. Auf diese Weise können auch im anaeroben Fall hohe Raum-Zeit-Ausbeuten erzielt werden. Von den bekannten Varianten zur Biomasse-Rückhaltung erscheint die Immobilisierung durch Adsorption auf einen inerten Träger als eine effektive Alternative. Die Versuche zur anaeroben Behandlung von Brüdenkondensaten der Zellstoffindustrie mittels immobilisierter Mikroorganismen wurden in 12 l-Festbett-Umlaufreaktoren durchgeführt. Als Trägermaterial diente offenporiges Sinterglas der SCHOTT Mainz mit einer Porosität von 60% und einer Porengröße von 60-100 μm . Die Verweilzeit wurde iterativ auf 12 Stunden gesenkt und über einen Zeitraum von mehreren Monaten konstant gehalten. Dabei wurden 84% des chemischen Sauerstoffbedarfes bei Raumbelastungen von bis zu 88 kg CSB/m³ und Tag eliminiert.

Dr. A. Aivasidis
Prof. Dr. C. Wandrey
KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GMBH
Institut für Biotechnologie

EIN "GLASSCHWAMM" ALS BAKTERIENSPEICHER

ABWASSERREINIGUNG OHNE SAUERSTOFF

Biogas entsteht in der Natur überall dort, wo organisches Material unter Luftausschluß mikrobiell abgebaut wird und besteht im wesentlichen aus Methan und Kohlendioxid. Damit gelangen jährlich etwa 500 - 800 Millionen Tonnen Methan, welches von Mikroorganismen gebildet wird, in die Atmosphäre und somit wird ein wesentlicher Beitrag für den Kohlenstoff-Kreislauf in der Natur geleistet. Die dafür verantwortlichen Mikroorganismen sind extrem sauerstoffempfindliche Einzeller und gehören zu den Urformen von Leben auf unserem Planeten, zu den sogenannten "Archebakterien".

Großtechnisch nutzt man diesen natürlichen Vorgang bereits seit mehreren Jahrzehnten in den Faultürmen zur Behandlung von Überschußschlamm aus den Kläranlagen, mit dem Ziel, diesen deponierfähig zu machen. In der Abwasserreinigung gewinnt die anaerobe "Belebung" in den letzten Jahren zunehmende Bedeutung als eine sinnvolle Ergänzung zu den herkömmlichen Belebtschlammverfahren.

Zielsetzung ist hier, den überwiegenden Teil der organischen Schmutzfracht hochkonzentrierter Industrieabwässer energieschonend und umweltfreundlich zu eliminieren, wobei das anfallende Biogas zur positiven Bilanz des Prozesses beiträgt. Aerobe Verfahren lösen die Entsorgungsprobleme nur partiell, da bis zu 50% der organischen Verunreinigungen in Klärschlamm umgewandelt werden. Dadurch wird die Problematik teilweise auf eine Überschußschlamm Entsorgung verlagert. Hingegen wird

anaerob eine echte Entsorgung erreicht, dadurch daß bis zu 95% der Kohlenstoffquelle (organische Verschmutzung) zu Biogas umgewandelt und nur 3 - 4% in Biomasse überführt werden (Abbildung 1).

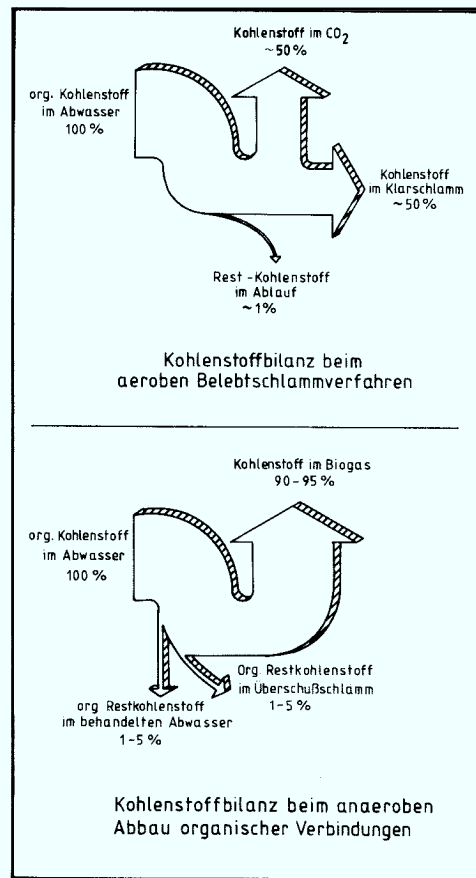


Abbildung 1. Kohlenstoffbilanz des aeroben und des anaeroben mikrobiellen Abbaus

Diese geringe Kohlenstoffinkorporation sowie die lange Generationszeit anaerober Zellen hängt mit der Energielimitierung des Wachstums unter sauerstofffreien Bedingungen zusammen. Die Stoffwechselaktivität der Anaerobier ist hingegen - trotz mancher Vorurteile - derjenigen aerober Mikroorganismen durchaus vergleichbar. Dies wird auch verständlich, wenn man be-

denkt, daß die Evolution unter energielimitierten Bedingungen die Auslese solcher Mutanten begünstigt, die einen besonders hohen Substratumsatz aus einem geringen zur Verfügung stehenden Energiepotential bewerkstelligen.

Die bevorzugten Substrate der Methanbakterien sind Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid, sowie in untergeordnetem Maße Methanol, Formiat und Methylamine. Diese Nahrungsspezialisierung der methanogenen Bakterien hat eine komplizierte Abbaukette zur Folge, sofern komplexe organische Verbindungen vorliegen. Das grundlegende Schema ist in Abbildung 2 dargestellt.

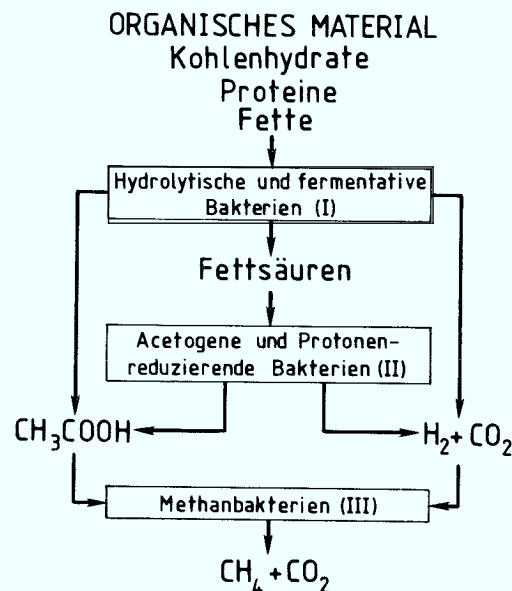


Abbildung 2. Abbauschema organischer Verbindungen durch anaerobe Mikroorganismen

Die organischen Substanzen wie Eiweiß, Fette und Kohlenhydrate werden zunächst mit Hilfe der fermentativen Bakterien hydrolysiert. Die Hydrolyseprodukte Aminosäuren, Fettsäuren und Fettalkohole werden weiter durch die acetogenen Bakterien

in Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid umgewandelt, bevor diese zum guten Schluß von den methanogenen Bakterien zu Methan und Kohlendioxid metabolisiert werden.

Wenn auch ausgewogene Co-Existenzverhältnisse zwischen allen drei Gruppen von Mikroorganismen garantiert sein müssen, damit ein ökologisches System einwandfrei funktioniert, so kommt doch den acetogenen und methanogenen "Teilnehmern" ein ganz besonderer symbiontischer Aspekt zu. Das Stoffwechselprodukt Wasserstoff bewirkt nämlich eine thermodynamische Hemmung des mikrobiellen Abbaus von Fettsäuren, wenn sein Partialdruck im System eine kritische Grenze (10^{-4} bar) überschreitet. Wird durch die Methanbakterien nicht für einen schnellen Verbrauch gesorgt, so kommt es zu einer Akkumulation von Buttersäure und insbesondere von Propionsäure ("Sauerwerden von Abwasserreaktoren").

In Wirklichkeit sind die Vorgänge bei weitem komplizierter und nur durch eine abgestimmte Kooperation der beteiligten Mikroorganismen wird eine Limitierung von Substraten bzw. eine Anhäufung von Zwischenprodukten vermieden.

Problemstellung

Das Wachstum der Mikroorganismen hängt von einer Reihe von Einflußgrößen ab, wie z.B. der Verweilzeit, der Temperatur, dem pH-Wert, dem Redoxpotential, der Nährstoffzusammensetzung u. a. Die Kenntnis der Wachstumsansprüche, der biochemischen Reaktionsabläufe, der Stabilität und Dynamik der Population sowie der Thermodynamik und Kinetik ist wesentlich für die Kontrolle der Reaktorsysteme und den gezielten Eingriff im Falle einer Störung.

Zentrales Problem, auch bei der anaeroben Abwasserreinigung, ist die Erzielung einer hohen Raum-Zeit-Ausbeute, d.h. möglichst viel Substrat (C-Quelle) in einem möglichst kleinen Reaktorvolumen und mit einer kurzen Verweildauer umzusetzen. Diese Forderung ist um so einfacher zu erfüllen, je höher die Konzentration der aktiven Biomasse im Reaktor ist. Aufgrund des energielimitierten Wachstums werden allerdings nur geringe Konzentrationen erreicht, zudem machen die langen Generationszeiten der Mikroorganismen entsprechend lange Verweilzeiten in kontinuierlichen Systemen erforderlich. Eine Verkürzung der Verweilzeit unterhalb des kritischen Wertes führt zum

raschen Auswaschen der Biomasse (Wash-out).

Sehr übersichtlich lassen sich die Verhältnisse in Form des in der Abbildung 3 gezeigten Diagramms beschreiben, wo die volumenspezifische Biogasbildung und Biogasausbeute als Funktion der Verweilzeit dargestellt sind. Man erkennt, daß das Maximum der Produktivität in der Nähe des Auswaschpunktes liegt und daß geringe Schwankungen des Durchflusses schon ausreichen, um durch höhere Verluste an Biomasse Instabilitäten zu erzeugen. In der Praxis ist es aber auch günstiger, bei einer etwas längeren Verweilzeit zu operieren als bei der zum Maximum korrespondierenden, weil durch die Erhöhung der Gasausbeute diese Einbuße wettgemacht wird.

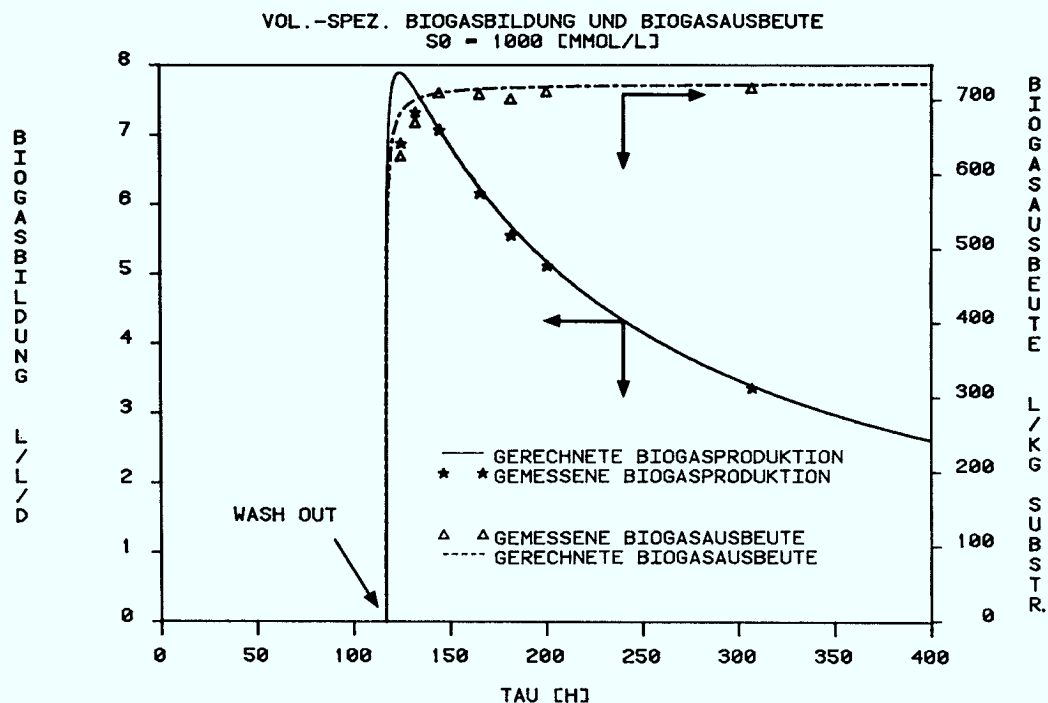


Abbildung 3. Vergleich zwischen gemessener und gerechneter volumenspezifischer Biogas-Bildung (Raum-Zeit-Ausbeute) und Biogas-Ausbeute beim Abbau von Essigsäure: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten

Da den Mikroorganismen eine katalytische Rolle zukommt, sind Verluste mit dem Reaktorablauf nach Möglichkeit zu vermeiden. Dies ist durch eine wirksame Methode der Biomasse-Rückhaltung und Biomasse-Rückführung möglich. In diesem Falle sollten Feststoffe aus dem Abwasserstrom entfernt werden, um eine äußerst unerwünschte Feststoffakkumulation zu vermeiden.

Biomasse-Rückhaltung bzw. -Rückführung

In einem gut durchmischten Rührkessel ist die Verweilzeit für die Flüssigkeit mit derjenigen suspendierter Mikroorganismen identisch. Werden diese allerdings im Reaktor zurückgehalten oder im Ablaufstrom abgetrennt und zurückgeführt, kommt es zu einer Entkopplung von Feststoff- und Flüssig-Verweilzeit. Während sich die Mikroorganismen im Reaktor anreichern, kann das Abwasser schneller durchfließen. Eine Zusammenstellung der wichtigsten Methoden zur Biomasse-Rückgewinnung befindet sich in Tabelle 1. Varianten der Biomasse-Rückhaltung erläutert Abbildung 4.

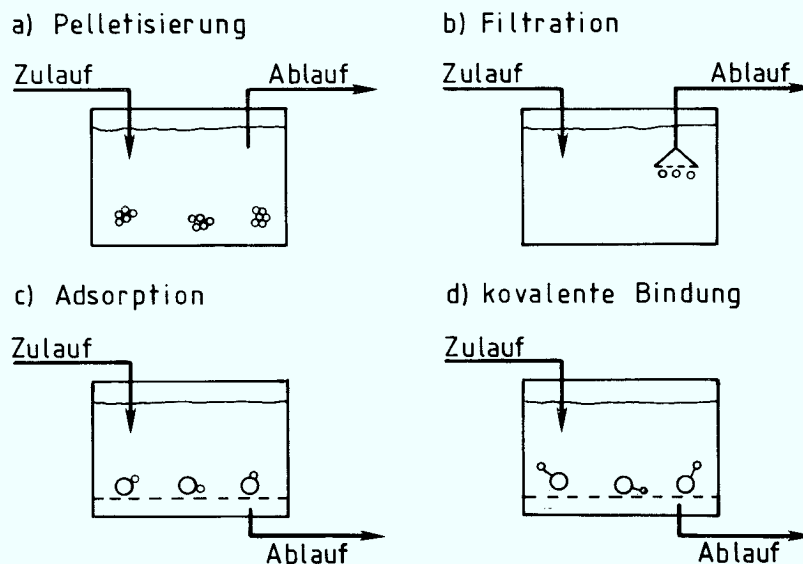


Abbildung 4. Schematische Darstellung von Methoden zur Biomasse-Rückhaltung: a) Ausflockung und Pelletisierung, b) Filtration, c) Immobilisierung durch Adsorption, d) Immobilisierung durch kovalente Verknüpfung

A) Biomasse-Rückhaltung (intern)

- 1. Sedimentation durch Flokkulation und Pelletbildung
 - 1.1 Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)
- 2. Filtration
 - 2.1 Membrane Anaerobic Reactor System (MARS)
 - 2.2 Flachmembran-Filtration
 - 2.3 Rotor-Fermenter
- 3. Immobilisierung durch Adsorption
 - 3.1 Festbett-Reaktor
 - 3.2 Festbett-Umlaufreaktor
 - 3.3 Anaerober Filmreaktor
 - 3.4 Wirbelschicht-Reaktor
- 4. Immobilisierung durch Einschluß oder kovalente Verknüpfung

B) Biomasse-Rückführung (extern)

- 1. Sedimentation durch chemische oder physikalische Abscheidung
 - 1.1 Anaerober Kontaktprozeß (Flokkulation)
 - 1.2 Anaerobic-Aerobic Methane (ANAMET)-Prozeß (Lamellenabscheider)
 - 1.3 Zentrifugation
- 2. Flotation

Tabelle 1. Methoden der Biomasse-Rückgewinnung in der anaeroben Abwasserreinigung

Mikroorganismen bilden unter bestimmten, meist von der Empirie diktierten Bedingungen größere Aggregate und Pellets mit guten Sedimentationseigenschaften. Auf diesem Prinzip beruht die derzeit in den Niederlanden am häufigsten verwendete Reaktormform zur Behandlung von Abwässern der Lebensmittelindustrie, der Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)-Reaktor. Hier kann bei einer Verweilzeit von 4 bis 6 Stunden und einer Raumbelastung von 8 - 20 kg CSB/(m³·d) eine Reduktion des chemischen Sauerstoffbedarfes um 80 - 90% erreicht werden. Nachteile dieses für niedrig- bis mittelkonzentrierte Abwässer geeigneten Prozesses sind zum einen das mangelnde Verständnis der Mechanis-

men zur Pelletbildung und zum anderen die sehr geringe Biomasse-Aktivität.

Die Filtration stellt zwar eine wirksame Art der Mikroorganismen-Abtrennung dar, daß in Abhängigkeit von der Porenweite des Filters beliebige Zellen zurückgehalten werden können, jedoch bereitet das Verstopfen der Poren beachtliche Schwierigkeiten. Ferner ist der Energieaufwand so hoch, daß nur kleine Mengen hochkonzentrierter Abwässer in Frage kommen. Eine technische Realisation der Membranfiltrationstechnik in der anaeroben Abwasserreinigung hat bislang nicht stattgefunden.

Eine Teilchenvergrößerung und damit auch eine leichte Abtrennbarkeit der Flüssigphase wird durch Immobilisierung der Mikroorganismen entweder durch Adsorption auf einem inerten Trägermaterial oder durch Einschluß in organischen Polymernetzwerken bzw. chemische Bindung über Reaktivgruppen an einem Träger erreicht. Davon erscheint nur die Adsorption als die sinnvolle in die Praxis umsetzbare Alternative, während der Einschluß oder die kovalente Verknüpfung einen eher akademischen Charakter behalten werden.

Bei der externen Biomasse-Rückführung wird eine Sedimentation durch Ausflockung nach Chemikalienzugabe oder durch Vergrößerung der Trennfläche (Lamellenabscheider) erreicht. Auch eine Erhöhung des Schwerefeldes durch Zentrifugation oder eine Vergrößerung des Dichteunterschiedes durch die Flotation ist möglich. Prinzipien der Biomasse-Rückführung sind in Abbildung 5 schematisch dargestellt.

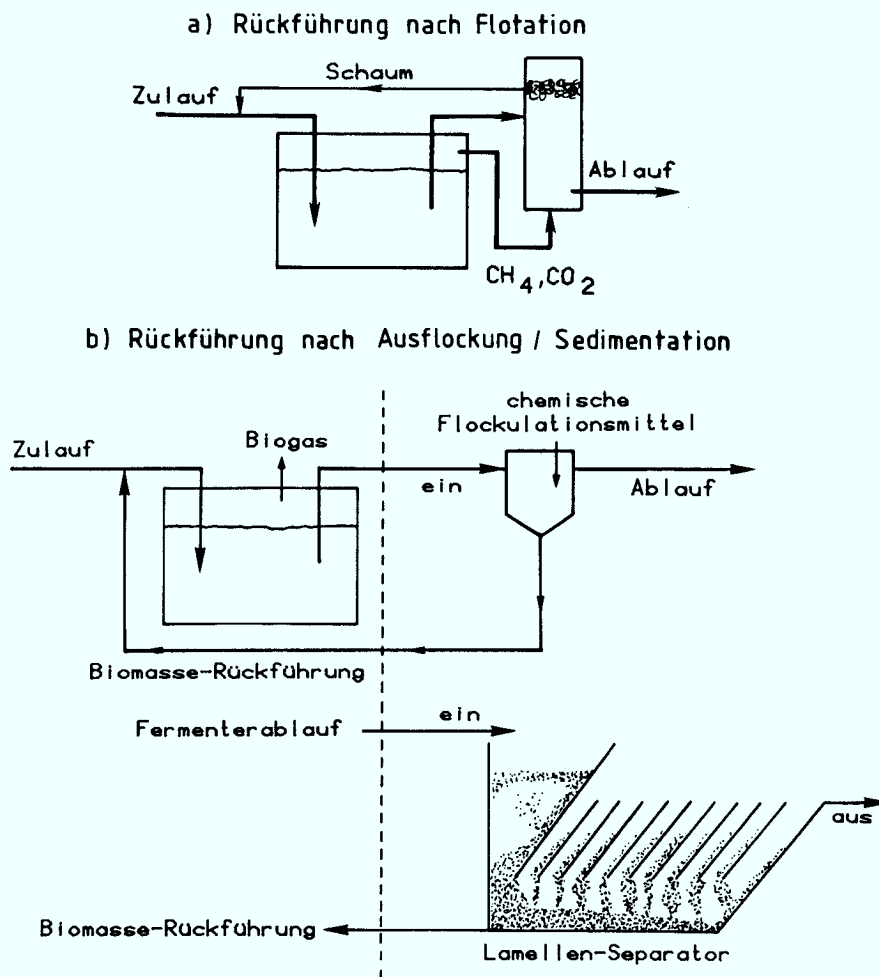


Abbildung 5. Schematische Darstellung von Methoden zur Biomasse-Rückführung: a) Schaumaustragung durch Flotation, b) Abtrennung durch externe chemische oder physikalische Abscheidung

Immobilisierung durch Adsorption

Bei der Immobilisierung von Mikroorganismen durch Adsorption nutzt man ihre natürliche Fähigkeit, sich an Oberflächen festzusetzen. Schätzungsweise etwa 90% der Mikroorganismen in der Natur liegen in irgendeiner Weise fixiert vor. In technischen Systemen kann diese Eigenschaft dadurch gefördert werden, daß die Verweilzeit bewußt unterhalb des Auswaschpunktes eingestellt wird. Unter diesen Streßbedingungen kommt es bei gleichzeitiger Erhöhung der Mutationsrate zu einer Selektionierung zugunsten derjenigen Mikroorganismen, die gute Adhäsionseigenschaften auf dem Träger entwickeln können. Als Trägermaterialia-

lien kommen Sand, Plastik, Glas, Kohle, Lavagestein, Keramik etc. in Frage. Eine Zusammenstellung von Reaktorkonfigurationen zur Trägerfixierung von Mikroorganismen gibt Abbildung 6 wieder.

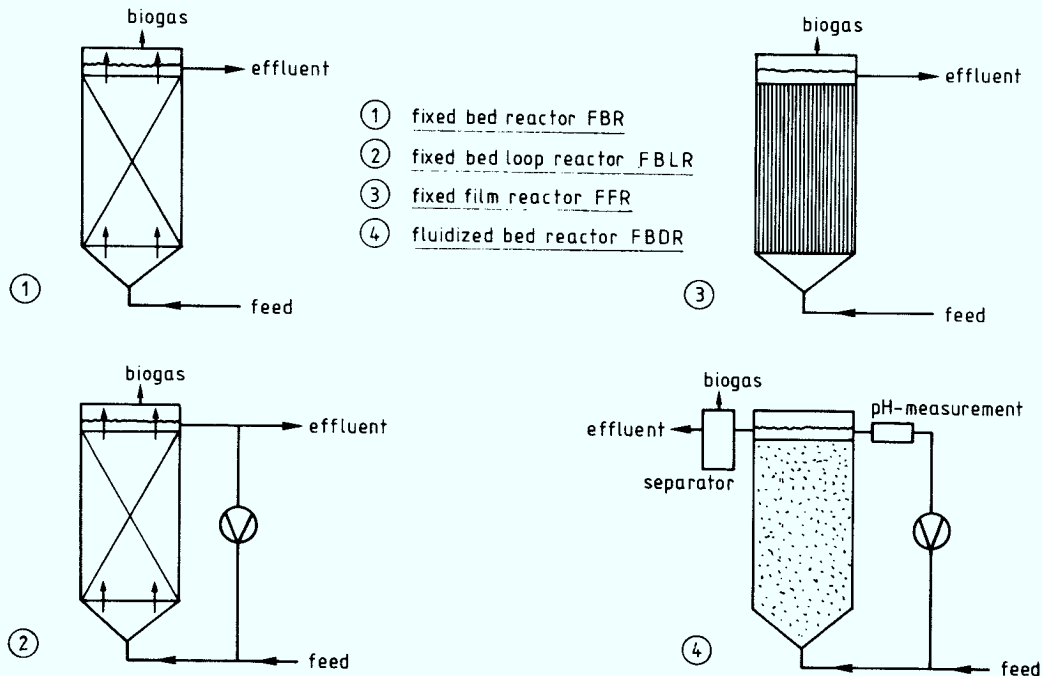


Abbildung 6. Reaktortypen zur Immobilisierung von Mikroorganismen in der anaeroben Abwasserreinigung

Der Festbettreaktor, vielfach in den USA zur Behandlung mittelkonzentrierter Abwässer angewendet, neigt besonders bei feststoffhaltigen Abwässern zur Verstopfung; zudem machen sich die Konzentrations- und pH-Gradienten sowie der Biogasstau in der Schüttung sehr nachhaltig bemerkbar.

Zwar entfallen alle diese Nachteile beim Wirbelschichtreaktor, wo gute Durchmischungsverhältnisse und eine freie Entgasung gegeben sind, dennoch begrenzen die Verluste an Biomasse durch Abrieb die Trägerdichte im Reaktor. Nach den bisherigen Erfahrungen lassen sich bevorzugt besonders dünne Abwässer damit behandeln, wobei Verweilzeiten von 1 - 3 Stunden erreich-

bar sind. Bei höher verschmutzten Abwässern ist eine Verlängerung der Verweilzeit erforderlich infolge einer maximalen Abbaukapazität von $50 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$.

Der Festbett-Umlaufreaktor nimmt eine Zwischenstellung ein und kombiniert die Vorteile der vorher beschriebenen Typen, wobei deren Nachteile gleichzeitig ausgeschaltet werden.

Einsatz poröser Sinterglaskörper im Festbett-Umlaufreaktor zur Immobilisierung von Mikroorganismen

In Abbildung 7 wird das Verfahren nach der Festbett-Umlauf-Technik grafisch erläutert. Es handelt sich dabei um eine Laboranlage mit einer Höhe von 1,2 m, einem Durchmesser von 0,12 m und einem Arbeitsvolumen von 12 l. Die Reaktorinnenwand ist in regelmäßigen Abständen mit ringförmigen Einsätzen versehen, zur Umlenkung der Strömung und zur Vermeidung von Wandkanälen. Verschiedene axial angeordnete Stutzen gestatten das Anbringen von Sonden zur Temperaturmessung, pH- und Niveau-Regelung sowie zur Probe- und Produktentnahme und Rezirkulation der Reaktorflüssigkeit. Der Zulaufstrom wird im unteren Reaktorteil der rezirkulierten Flüssigkeit beigemischt und dem im Reaktor herrschenden pH-Wert annähert. Die Lineargeschwindigkeit beträgt 1,5 - 4,0 m/h, d.h. weit unterhalb der zur Fluidisierung der Schüttung erforderlichen Geschwindigkeit. Andererseits ist diese ausreichend für eine gradientenfreie Durchmischung und eine rasche Entfernung gasförmiger Produkte ohne die Ausbildung von Gaspolstern.

Als Träger diente Sinterglas der Schott-Werke AG, Mainz. Es handelt sich hier um nach einem speziellen Sinterprozeß hergestellte Glaskörper, die durch ein großes Porenvolumen und offene, gleichmäßig verteilte Poren gekennzeichnet sind. Ausgangsmaterial zur Herstellung solcher neuartiger Materialien ist Glaspulver, welches mit einer schwer schmelzbaren aber leicht löslichen Substanz vermischt und die Mischung zur Versinterung des Glases um die Erweichungstemperatur erhitzt wird. Nach dem Sintervorgang wird der zugeführte

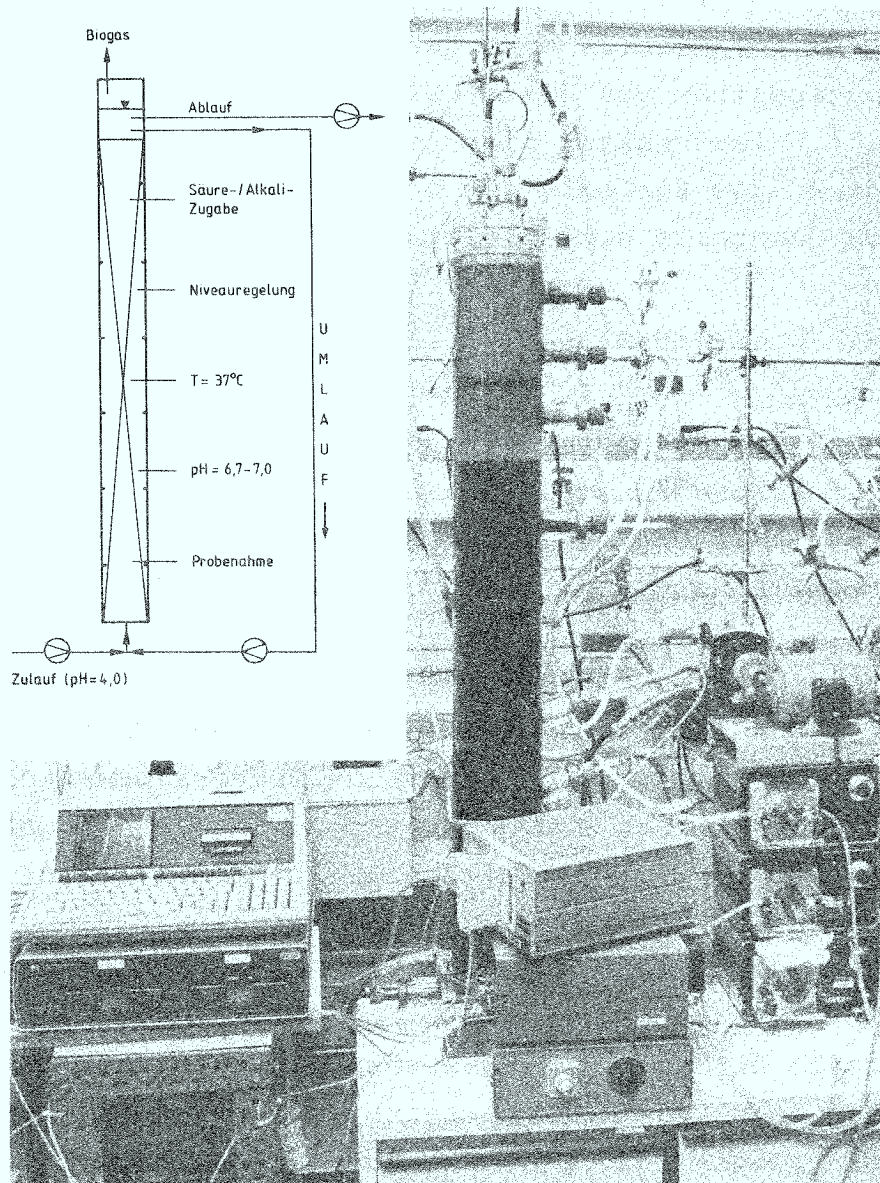


Abbildung 7. Festbett-Umlaufreaktor mit On-line-Datenerfassung und Prozeßrechnersteuerung und fließschematische Darstellung des Verfahrensablaufes

Füllstoff aus dem Gemisch herausgelöst. Die Porengröße und -verteilung wird von der Korngröße und homogenen Verteilung des Füllstoffes, die Porosität vom prozentualen Anteil des Füllstoffes bestimmt. Solche Sinterglaskörper erscheinen aufgrund des durch die Herstellungsbedingungen verifizierbaren

Aufbaus besonders interessant zur Immobilisierung von Mikroorganismen in der Biotechnologie. Die Porosität und die Porengröße dürften wesentlich die Kolonialisierung dieser Glaschwämme durch die Mikroorganismen beeinflussen. Hinzu kommt, daß die nach der Entfernung des Füllstoffes verbleibenden durchgängigen Hohlräume ein Labyrinth darstellen, wo sich die Zellen "verirren" und besonders lange Strecken zurücklegen müssen. Andererseits ist diese Struktur weitgehend offen, so daß ein limitierungsfreier Stofftransport (Substratversorgung bzw. Produktentfernung) bei guter Durchströmung gewährleistet ist. Produkte der Zellyse werden ebenfalls leicht ausgetragen, womit eine Vergiftung der aktiven Zellen an den eigenen Abbauprodukten vermieden wird.

Im Gegensatz zur reinen Adsorption bei nicht porösen Trägern wird hier die Mikroorganismensuspension wie von einem Schwamm aufgesaugt und die Zellen können mit der Bildung von Mikrokolonien in ihrer neuen Umwelt weiterwachsen.

Sehr interessant erscheint auch die Verwendung von Gläsern, die Spurenelemente wie z.B. Verbindungen von Nickel, Molybdän, Kupfer, Kobalt und dgl. enthalten. Es ist bekannt, daß Glas trotz seines global inerten Verhaltens einem gewissen Ionenaustausch mit der Umgebung unterliegt, so daß sich solche im Material enthaltenen Spurenstoffe förderlich auf das Verhalten der Mikroorganismen auswirken können.

Weitere spezifische Vorteile der Sinterglaskörper, die für einen breiten Einsatz in der Biotechnologie wünschenswert wären, sind folgende:

- der hydrophile Charakter (Benetzbarkeit)
- die mechanische Stabilität
- die thermische Stabilität (Sterilisierbarkeit des Trägers bei Reinkulturfermentationen)
- die Formbarkeit
- die einstellbare Dichte
- die große innere Oberfläche (wodurch größere Partikel verwendet werden können zur Minimierung des Strömungswiderstandes der Schüttung, ohne die verfügbare Oberfläche wesentlich zu verkleinern)
- der Einsatz nicht nur im Fest- sondern auch im Wirbelbett ohne Reibungsverluste, weil die Zellen im Träger ansiedeln

Zur Untersuchung gelangten Sintergläser mit einer Porosität von ca. 60% und einem Porendurchmesser von 60 - 100 μm in Form von Würfeln (Kantenlänge = 5 mm) und Raschigringen (Wandstärke = 2 mm, Höhe = 7 mm). Abbildung 8 zeigt elektronenmikroskopische Aufnahmen der Oberfläche und einer Schnittfläche unterschiedlich vergrößert, wodurch die besonderen strukturellen Merkmale dieser Festkörper sehr deutlich werden.

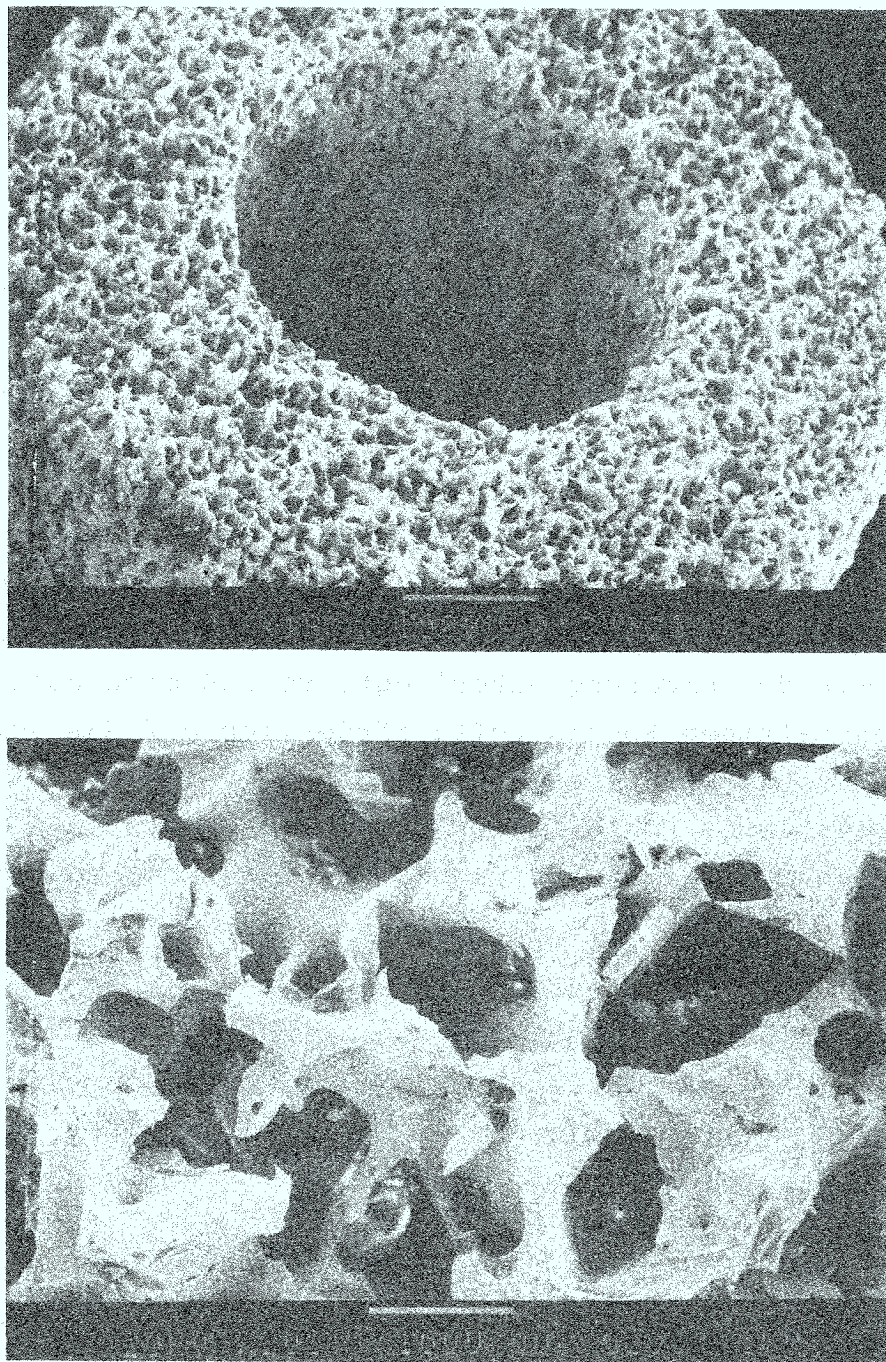


Abbildung 8. Elektronenmikroskopische Aufnahmen der Oberfläche und einer Schnittfläche der Sintergläser in Form von Raschigringen (Porosität 60%, Porengröße 60-100 μm)

Am Beispiel der Immobilisierung von anaeroben Bakterien zur Behandlung von Brüdenkondensaten der Zellstoffindustrie soll die Trägereignung dieser Glasschwämme dokumentiert werden. Diese Abwässer fallen in größerer Menge in der Zellstoffindustrie beim Aufkonzentrieren der Sulfitablauge an und enthalten im Mittel:

12 - 30	kg/m ³	Essigsäure
0,3 - 2,5	kg/m ³	Furfural
0,5 - 2,8	kg/m ³	Methanol
0,6 - 1,3	kg/m ³	oxidierte Schwefelverbindungen

bei einem pH-Wert von 1,5 - 2,0.

Der chemische Sauerstoffbedarf liegt bei 5 - 44 kg/m³. Der CSB-Wert des verwendeten Abwassers war 44 kg/m³. Vor der Einspeisung in den Reaktor werden dem Abwasserstrom geringe Mengen an Vitaminen sowie Mineralsalzen und Spurenelementen zugesetzt, die für das Wachstum der Mikroorganismen erforderlich sind. Der pH-Wert im Zulauf beträgt 3,5 - 4,0, derjenige im Reaktor 6,3 - 6,7. Dieser pH-Sprung ist durch den Säureabbau und die gute Pufferung des Systems möglich. Zum Anfahren des Reaktors wird die in den Poren der Glaskörper eingeschlossene Luft unter vermindertem Druck oder durch Inertgas entfernt. Dazu wird anschließend eine auf die Abwasserinhaltsstoffe adaptierte Mischpopulation gegeben und sodann die von einem pH-Regler kontrollierte Abwasserzufuhr gestartet. Diese Arbeitsweise gestattet, daß jeweils eine solche Menge eingeleitet wird, die auch von den Mikroorganismen abgebaut werden kann und hat den Vorteil, daß der Anfahrvorgang schonend (ohne die Gefahr einer Übersäuerung) - jedoch gleichzeitig unter genügender Streßbelastung - für die Mikroorganismen erfolgt. Die Verkürzung der Verweilzeit wird dann iterativ vom pH-Regler übernommen.

Abbildung 9 gibt die Zunahme des Abwasserdurchsatzes beim Anfahren des Reaktors in Abhängigkeit von der Betriebszeit wieder. In Abbildung 10 ist die zugehörige Biogasproduktion als Funktion der Zeit aufgetragen. Man beobachtet eine ebenfalls lineare Zunahme der Biogasbildungsgeschwindigkeit (Verdopplung in etwa 5,5 Tagen), die bei einer Verweilzeit von 12 Stunden einen Wert von 51 m³ pro Kubikmeter Reaktorvolumen und Tag

erreicht. Dabei wurden bei einer Raumbelastung von $88 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ $74 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ eliminiert.

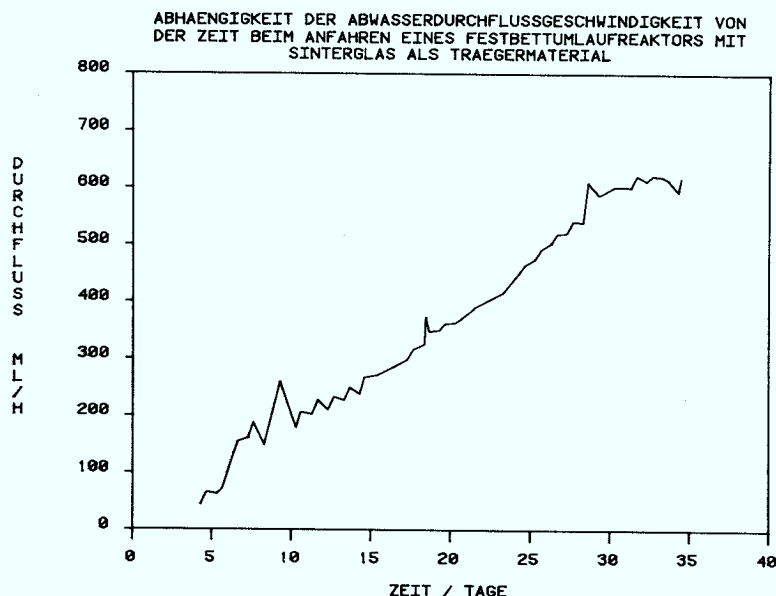


Abbildung 9. Zunahme des Brüdenkondensat-Durchsatzes beim Anfahrvorgang eines 12-l-Festbett-Umlaufreaktors mit Sinterglas-Trägern in Abhängigkeit von der Zeit

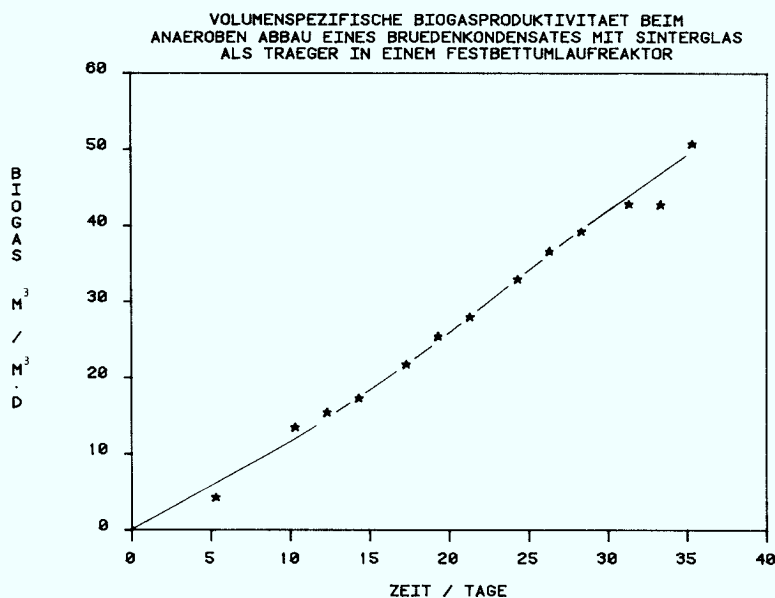


Abbildung 10. Volumenspezifische Biogasbildung beim anaeroben Abbau eines Brüdenkondensates im Festbett-Umlaufreaktor in Abhängigkeit von der Zeit

Eine Zusammenstellung der erzielten Ergebnisse gibt Tabelle 2 wieder.

Reaktorvolumen	:	12	l
Trägerschüttung	:	7,4	l
CSB _{ein} (Fracht Zulauf)	:	44,0	kg/m ³
CSB _{aus} (Fracht Ablauf)	:	7,0	kg/m ³
Verweilzeit	:	12	h
Biomassekonzentration	:	12,44	g/l (Stickstoffanalyse)
CSB-Umsatz	:	84	%
Raumbelastung	:	88,0	kg CSB/(m ³ ·d)
Schlammbelastung	:	7,0	kg CSB/(kg X·d)
CSB-Elimination	:	74,0	kg/(m ³ ·d)
Schlammaktivität	:	5,9	kg CSB/(kg X·d)
Biogasbildung	:	51,0	m ³ /(m ³ ·d)

Tabelle 2. Anaerober Abbau eines Brüdenkondensates im Festbett-Umlauf-Reaktor mit Sinterglas als Trägermaterial (Würfelform, a = 0,5 cm)

Wenn man sich vor Augen führt, daß zur Erzielung befriedigender Abbauergebnisse in einem Rührkessel ohne Biomasse-Rückführung eine Verweilzeit von ca. 10 d erforderlich ist, wird die Effizienz dieser Immobilisierungstechnik deutlich.

Abwasserreinigung im Vergleich

Abbildung 11 zeigt eine Gegenüberstellung der Raumzeitausbeute aerober und anaerober Abwasserbehandlungsverfahren. Daraus erkennt man ganz global, daß unter anaeroben Bedingungen höhere Reinigungsleistungen erzielt werden können. Dies ist bedingt durch den Wegfall des Eintrages des wenig wasserlöslichen Sauerstoffes, der in aeroben Systemen den limitierenden Faktor darstellt. Weiterhin wird deutlich, daß die Verwendung von

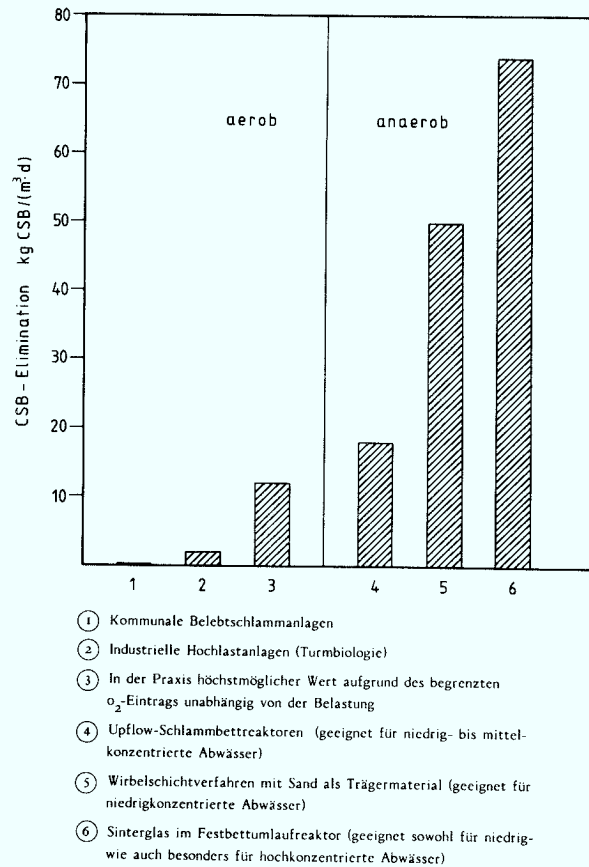


Abbildung 11. Gegenüberstellung aerober und anaerober Abwasserreinigungungsverfahren (Erläuterung siehe Abbildungslegende)

Sinterglas als Trägermaterial im Festbett-Umlaufreaktor den höchsten Wert liefert, doch dazu bedarf es einiger Erläuterungen. Die Verhältnisse sind nämlich insofern nicht ganz vergleichbar, als daß die Konzentration der organischen Belastung bei den aufgeführten Prozessen unterschiedlich ist und eine höhere Belastung im Zulauf automatisch zu hohen Raumbelastungen führt. Upflow-Schlammbedtreaktoren und Wirbelschichtreaktoren ermöglichen allerdings nur dann kurze Verweilzeiten, wenn relativ "magere" Abwässer vorliegen ($\text{CSB}_{\text{ein}} = 2 - 6 \text{ kg/m}^3$). Andernfalls muß die Verweilzeit entsprechend einer maximalen Abbaukapazität verlängert werden.

Hingegen sind Sinterglaskörper im Festbett-Umlaufreaktor sowohl für "magere", als auch besonders für "fette" Abwässer

(CSB ein = 5 - 45 kg/m³) geeignet. Eine hohe Aktivität der Biomasse zeichnet ebenfalls diese Trägermaterialien aus. Während diese als Schlammaktivität bezeichnete Größe (kg abgebauter chemischer Sauerstoffbedarf pro kg Trockenmasse und Tag) bei Schlammbett- und Wirbelschichtreaktoren 0,25 bzw. 1,37 kg CSB/(kg X·d) ist, beträgt sie beim Festbett-Umlaufreaktor/Sinterglas-System 5,9 kg CSB/(kg X·d). Abbildung 12 zeigt Aufnahmen der mit Mikroorganismen be-

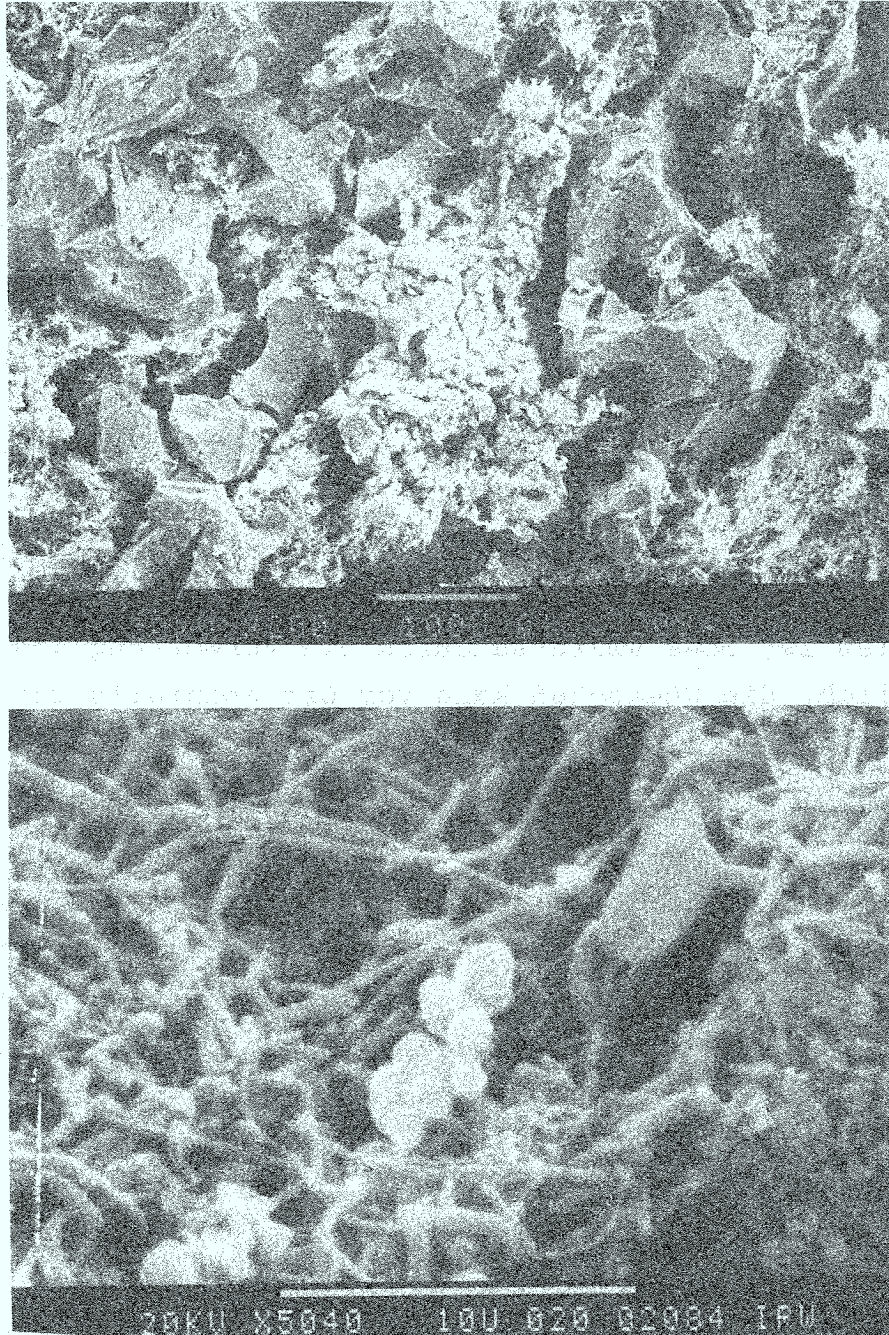


Abbildung 12. REM-Aufnahme der mit Mikroorganismen bewachsenen Sinterglas-Makroporen nach viermonatigem Reaktor-Betrieb

wachsenen Sinterglas-Makroporen mit einem Rasterelektronenmikroskop. Die überragend guten Ergebnisse mit diesem Material werden verständlich, wenn man bedenkt, daß über 90% der Erdkruste aus Silikaten besteht und daß in der Natur die meisten Mikroorganismen in immobilisierter Form vorliegen. Zur Zeit werden Versuche mit einer Pilotanlage (Reaktorvolumen = $1,5 \text{ m}^3$) durchgeführt. Darin sollen Kenndaten im Hinblick auf die Auslegung einer großtechnischen Anlage und die Berechnung der Wirtschaftlichkeit des Prozesses gewonnen werden.

Man muß sich daher im klaren sein, daß aus der Abwasserreinigung für den Betreiber kein Profit zu erwarten ist. Vielmehr handelt es sich hier um eine Notwendigkeit, die durch die zunehmende Umweltbelastung und den Druck der geltenden Abwassergesetzgebung gegeben ist, so daß eine Energieautarkie bei Minimierung der Betriebskosten der Anlagen den angestrebten Zustand darstellt.

Für eine optimale mikrobielle Tätigkeit ist eine Temperatur von 37°C notwendig. Da der Prozeß ohne fühlbare Wärmetönung abläuft, muß die zum Aufheizen des Zulaufs und zum Ausgleich von Verlusten erforderliche Wärmemenge von außen zugeführt werden. Dies ist ohne weiteres durch die Verwertung des Biogases möglich. Ein Überschuß kann vor Ort ebenfalls genutzt werden.

Ausblick

Die bisherigen überaus zufriedenstellenden Ergebnisse mit Sinterglas-Trägern zur Immobilisierung von Mikroorganismen im Festbett-Umlaufreaktor in der anaeroben Abwasserreinigung zeigen, daß diese Technologie grundsätzlich für eine umweltschonende energie- und raumsparende Behandlung von industriellen Abwässern geeignet ist. Die experimentellen Ergebnisse sprechen deutlich für sich.

Darüber hinaus stellen Sinterglaskörper aber auch einen universell einsetzbaren Träger zur Zellfixierung in der Biotechnologie dar, mit dem Ziel, Produkte wie Essigsäure und Ethanol sowie eine Reihe spezieller Chemikalien aus preiswerten Rohstoffen mit sehr hohen Raumzeitausbeuten zu gewinnen.

