



Forschungsgesellschaft Joanneum
 INSTITUT FÜR ÖKOsystemFORSCHUNG UND UMWELTMANAGEMENT
 A-8010 Graz, Elisabethstraße 11, Telefon (0316) 80-20

Projekt-Nr.: 3710/378001

ENDBERICHT

39 Seiten
 24 Abbildungen
 4 Tabellen

**ANAEROBE VORREINIGUNG VON KOMMUNALEM ABWASSER
 IN EINEM FLIESSBETTREAKTOR**

Kurztitel:
 "Anaerob-kommunale Abwässer"

Ch. HAYER

H.-M. KNOFLACHER

H. LUTTENBERGER

Forschungsgesellschaft Joanneum Graz,
 AGR Umweltbiotechnologie

Graz, im Februar 1989



INHALTSVERZEICHNIS

	<u>Seite</u>
1. EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG	1
2. MATERIAL UND METHODEN	2
2.1 Fließbettreaktor im Labormaßstab	2
2.2 Häusliches Abwasser	3
2.3 pH-Wert-Messung	3
2.4 Temperatur-Messung	3
2.5 Inokula	4
2.6 Bestimmung des chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB)	4
2.7 Fettsäureanalyse	4
2.8 Charakterisierung der Mikroorganismen	5
3. ERGEBNISSE	5
4. DISKUSSION	13
5. ZUSAMMENFASSUNG	16
6. LITERATUR	17
7. ABBILDUNGEN, TABELLEN, FOTOS	19

1. EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Kommunales Abwasser setzt sich aus häuslichem und gewerblichem Abwasser zusammen. Die Schwierigkeiten für die anaerobe Behandlung von kommunalem Abwasser bestehen in der starken Temperaturvariabilität (10 °C-35 °C) und der starken Verdünnung dieser Abwässer. Die Temperaturen fallen oft auch unter 10 °C ab. Relativ wenige Studien wurden über die mikrobiologische Charakteristik bei 10 °C, einer typischen Abwassertemperatur zur Winterzeit, durchgeführt (JEWELL, 1987). Das kommunale Abwasser stellt ein niedrig belastetes Abwasser (COD im Zulauf von z.B. 500 mg/l) dar (SWITZENBAUM & JEWELL, 1980; SWITZENBAUM et al., 1984). Die Konzentration an löslicher, organischer Substanz, die für die Unterstützung des mikrobiellen Wachstums benötigt wird, liegt bei der anaeroben Behandlung von kommunalem Abwasser in einem kritischen Grenzbereich (JEWELL, 1987).

SWITZENBAUM beschreibt 1984 den anaeroben Fließbettreaktor als gutes Verfahren zur Vorbehandlung von häuslichem Abwasser, gefolgt von einigen Nachbehandlungsprozessen. Der anaerobe Wirbelschichtreaktor wird als optimalste Basis für einen Hochleistungsreaktor bezeichnet. Die Prozeßvorteile liegen in der niedrigen Produktion von Überschussschlamm und in der Methanbildung. Sehr hohe COD-Umsatzkapazitäten werden durch eine Kombination von hoher Schlammkonzentration und hoher Schlammaptivität bewirkt. Ein weiterer Vorteil liegt im sehr geringen Platzbedarf des Fließbettreaktors (HEIJNEN, 1984).

Die Zweifel an der anaeroben Behandlung von häuslichem Abwasser bestehen in den langsamen Reproduktionsraten der Bakterien bei verdünnten Substratkonzentrationen und niedrigen Temperaturen (JEWELL, 1987).

Hauptsächlich finden sich Studien über die anaerobe Behandlung von kommunalem Abwasser bei niedrigen Temperaturverhältnissen mit Hilfe des AAFEB-Reaktors (anaerobic attached-film expanded-bed reactor, Schwebebettreaktor) (JEWELL, 1987; JEWELL & MORRIS, 1981; SWITZENBAUM et al., 1984; SWITZENBAUM & JEWELL, 1980). Der AAFEB kann Abwasser mit 200 mg/l COD und weniger bei niedrigen Temperaturen und niedrigen, hydraulischen Retentionszeiten abbauen (JEWELL et al., 1981). Die anfallende Schlammmenge erhöht sich jedoch mit fallender Temperatur (SWITZENBAUM & JEWELL, 1980).

Auch der UASB-Reaktor (upflow anaerobic sludge blanket) und der Anaerobe Filter werden angeführt (GENUNG et al., 1983; JEWELL, 1987; LETTINGA et al., 1983). Der UASB-Reaktor ist zwar für die Behandlung von warmem, konzentriertem Abwasser (COD im Zulauf unter 1.000 mg/l) erfolgversprechend, jedoch für die Behandlung von kühlem, verdünntem, häuslichem Abwasser ungeeignet (JEWELL et al., 1981). Der Anaerobe Filter kann Abwasser mit einem COD im Zulauf unter 759 mg/l, speziell bei Temperaturen um 20 °C und darunter, nicht behandeln (YOUNG & McCARTY, 1969; JEWELL et al., 1981). Eine einzige Literaturstelle berichtet von einer Studie über die anaerobe Behandlung von häuslichem Abwasser mit Hilfe eines anaeroben Fließbettreaktors im Pilotmaßstab bei Temperaturen von 10 °C-23 °C (SWITZENBAUM et al., 1984).

Die anaerobe Behandlung von häuslichem Abwasser bei niedriger Konzentration an löslicher, organischer Substanz bei niedrigen Temperaturverhältnissen und niedrigen Verweilzeiten wurde anhand dieser Studie untersucht. Weiters verfolgte man quantitative und qualitative Schwankungen innerhalb der Protozoenpopulation im Fließbettreaktor.

2. MATERIAL UND METHODEN

2.1 Fließbettreaktor im Labormaßstab

Die Mikroorganismen werden an einen Träger (Kieselsäure) gebunden, um genügend aktive Biomasse im Reaktor zurückzuhalten. Dadurch wird eine hohe Aktivität pro Volumeneinheit erreicht. Das Prinzip des Wirbelschichtreaktors liegt in der Durchströmung des feinen Trägermaterials von unten nach oben, wodurch die Kieselsäure in Schwebelage gehalten wird.

Abbildung 1 zeigt die im Labor verwendete Versuchsanordnung des Fließbettreaktors.

Kenngrößen des Wirbelschichtreaktors:

Gesamtvolumen: 3,5 l

Bettvolumen: 2,0 l

Trägermaterial: Sand (getrocknet bei 105 °C, Korngröße 0,2-0,4 mm, von der
Veltscher Magnesitwerke AG)

Temperatur im Fließbettreaktor I: 13,9 °C \pm 1,0 °C

Temperatur im Fließbettreaktor II: 17,9 °C \pm 0,5 °C

2.2 Häusliches Abwasser

Es wurde ein synthetisches Abwasser verwendet, das nach OECD, 1972, verifiziert wurde.

Zusammensetzung: Angaben in mg/l

Pepton aus Casein	160
Fleischextrakt	110
Harnstoff	30
NaCl	7
CaCl ₂ · 2H ₂ O	4
MgSO ₄ · 7H ₂ O	2
Na ₂ HPO ₄ · 2H ₂ O	17
KH ₂ PO ₄	1,5

2.3 pH-Wert-Messung

Der pH-Wert von Zu- und Ablauf wurde mit einer pH-Elektrode gemessen.

2.4 Temperatur-Messung

Der Fließbettreaktor I wurde bei einer niedrigen Temperatur von 13,9 °C \pm 1,0 °C betrieben. Im Fließbettreaktor II bestanden Temperaturen von 17,9 °C \pm 0,5 °C.

2.5 Inokula

Fließbettreaktor I:

200 ml Trübwasser der Großkläranlage Gössendorf wurden 19,5 Stunden mit 300 g Sand (Korngröße 0,2-0,4 mm) bei Raumtemperatur stehengelassen und danach als Impfmateriale für das Fließbett I verwendet. 200 g Sand wurden am 13. Tag nachgegeben.

Fließbettreaktor II:

200 ml Trübwasser der Großkläranlage Gössendorf wurden 18,0 Stunden mit 400 g Sand (Korngröße 0,2-0,4 mm) bei Raumtemperatur stehengelassen und anschließend als Impfmateriale für den Fließbettreaktor II verwendet. 200 g Sand wurden am 27. Tag nachgegeben.

2.6 Bestimmung des chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB)

Die CSB-Bestimmung gibt eine wichtige Aussage über den Abbau organischer Verbindungen. Sie erfolgt gemäß dem "Deutschen Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung". Es wurden die CSB-Konzentrationen von Zu- und Ablauf erfaßt. Die Proben des Fließbettreaktors I wurden ab dem 9. Tag filtriert, die Proben des Fließbettreaktors II wurden ab dem 1. Tag filtriert; d.h., es wurde der lösliche COD (soluble (filtered) chemical oxygen demand) gemessen.

2.7 Fettsäureanalyse

Die flüchtigen Fettsäuren Essigsäure (ES), Propionsäure (PS), iso-Buttersäure (iBS), Buttersäure (BS), iso-Valeriansäure (iVS) und Valeriansäure (VS) wurden gaschromatographisch nachgewiesen. Die Trennbedingungen zur gaschromatographischen Bestimmung der flüchtigen Fettsäuren sind folgende:

Probevolumen:	1 µl
Trennsäule:	Chromosorb 101 (80 - 100 mesh) 1,8 m

Detektion:	Flammenionisationsdetektor
Trägergas:	Stickstoff; 30 ml/min.
Brennergas:	Luft; 260 ml/min. Wasserstoff; 20 ml/min.
Injektortemperatur:	200 °C
Ofentemperatur:	170 °C
Detektortemperatur:	250 °C

Das Chromatogramm eines Fettsäurestandardgemisches ist in Abbildung 2 dargestellt.

2.8 Charakterisierung der Mikroorganismen

Die Bakterien wurden mit Hilfe der Gramfärbung nach Müller-Melchinger in grampositive und gramnegative Mikroorganismen unterteilt. Die Flagellatenart bestimmte man nach dem Bestimmungsschlüssel von KUDD, 1954. Die Vorfixierung erfolgte mit Formaldehyddämpfen. Die Kernfärbung führte man nach KANGATHARALINGAM & FERGUSON, 1984 durch. Die Nahrungsvakuole wurde mit Neutralrot gefärbt. Die Flagellaten wurden mit Hilfe einer Thomakammer mit einem Hellfeld-Durchlichtmikroskop (Olympus BR-2) ausgezählt. Man verwendete für die Fotografie eine NIKON FM 2 und einen Schwarz-Weiß-Film (ILFORD FP 4, 135, DX 36). Die Ausarbeitung erfolgte auf Ilfospeed-Multi-grade II-Fotopapier und einem Filter 5. Die Farbfotos wurden mit einer NIKON FM 2 und einem Kunststoffilm (KODAK EKTACHROME 160/23 DIN, ET 135-36) durchgeführt. Die Kernfärbung betrachtete man mit Hilfe eines ZETOPAN-Durchlicht-Fluoreszenzmikroskopes.

3. ERGEBNISSE

Der Einfluß von psychrophilen Temperaturverhältnissen und niederen Verweilzeiten auf den anaeroben Abbau von organisch niedrig belastetem Abwasser in einem Fließbettreaktor wurde untersucht. Die Schwankungen innerhalb einer etwaig auftretenden Protozoenpopulation wurden quantitativ und qualitativ erfaßt. Es wurden zwei Wirbelschichtreaktoren im Labormaßstab betrieben.

Der Fließbettreaktor I, ein 3,5 l, anaerober Wirbelschichtreaktor, wurde seit 16. Juni 1988 im Labor betrieben. Das Trägermaterial - 300 g Sand (Korngröße 0,2-0,4 mm; getrocknet bei 105 °C) - wurde mit 200 ml Trübwasser der Großkläranlage Gössendorf beimpft und danach in den Reaktor eingebracht. 200 g Sand wurden am 13. Tag nachgegeben. Das häusliche Abwasser wurde synthetisch hergestellt und im Vorratsbehälter bis zum 27. Tag bei Raumtemperatur ($21,6 \text{ °C} \pm 1,3 \text{ °C}$) aufbewahrt. Danach wurde es jedoch mit Hilfe einer Kühlschlange auf $14,5 \text{ °C} \pm 1,9 \text{ °C}$ gekühlt, um einem zu raschen, aeroben Abbau des Substrates entgegenzuwirken. Das Abwasser wurde über eine Pumpe mit einem Feed von 10 ml/min. bis zum 41. Tag kontinuierlich zudosiert. Die Verweilzeit wurde auf 5,8 Stunden (0,24 Tage) eingestellt. Der Feed wurde ab dem 42. Tag auf 30 ml/min. umgestellt. Die Verweilzeit vom 42. bis zum 54. Tag betrug 2,0 Stunden (0,08 Tage).

Der 3,5 l anaerobe Labor-Fließbettreaktor II wurde am 10.08.1988 in Betrieb genommen. 400 g Sand (Korngröße 0,2-0,4 mm; getrocknet bei 105 °C) wurden als Trägermaterial mit 200 ml Trübwasser der Großkläranlage Gössendorf 18,0 Stunden bei Zimmertemperatur stehen gelassen und danach in den Reaktor eingebracht. Weitere 200 g Sand wurden am 27. Tag zugegeben. Das häusliche, synthetische Abwasser wurde in einem Vorratsbehälter steril und mit Hilfe einer Kühlschlange bei einer mittleren Temperatur von $17,3 \text{ °C} \pm 1,1$ aufbewahrt. Die Verweilzeit betrug bis zum 41. Tag 5,8 Stunden (0,24 Tage) und vom 42. bis zum 49. Tag 2,0 Stunden (0,08 Tage).

In Tabelle 1 bzw. 2 sind Werte der Meßparameter für den Fließbettreaktor I bzw. II aufgelistet. Die mittlere Abwassertemperatur im Fließbettreaktor I betrug $13,9 \text{ °C} \pm 1,0$ und im Fließbettreaktor II $17,9 \text{ °C} \pm 0,5$ während der gesamten Meßphase. Die Biomasse betrug während der gesamten Meßphase im Fließbettreaktor I einen durchschnittlichen Wert von 22,43 mg/g Trägermaterial und im Fließbettreaktor II einen Mittelwert von 25,71 mg/g Sand. Ein Biomassewert von 181,8 mg/g Sand wurde am 49. Tag gemessen, jedoch in den Mittelwert nicht miteingebracht. Der O_2 -Gehalt betrug im Fließbettreaktor I durchschnittlich $0,3 \text{ mg/l} \pm 0,1$ und im Fließbettreaktor II im Mittel $0,2 \text{ mg/l} \pm 0,1$.

Der zeitliche Verlauf der CSB-Konzentrationen im Zu- und Ablauf des Fließbettreaktors I wird in Abbildung 3 graphisch dargestellt. Die Zulaufkonzentration betrug während der gesamten Meßdauer im Mittel $0,344 \text{ kg CSB/m}^3 \pm 0,166$. Die Ablaufkonzentration schwankte zwischen $0,014$ (14. Tag) und $0,462 \text{ kg/m}^3$ (27. Tag) bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden und ergab einen Durchschnittswert von $0,237 \text{ kg CSB/m}^3 \pm 0,144$. Die CSB-Belastung im Ablauf zeigte Schwankungen zwischen $0,302$ (44. Tag) und $0,524 \text{ kg/m}^3$ (43. Tag) bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden und machte einen mittleren Wert von $0,461 \text{ kg CSB/m}^3 \pm 0,066$ aus.

Abbildung 4 zeigt die zeitliche Abhängigkeit der CSB-Konzentrationen im Zu- und Ablauf des Fließbettreaktors II. Die Zulaufkonzentration machte während der gesamten Meßphase durchschnittlich $0,466 \text{ kg CSB/m}^3 \pm 0,085$ aus. Die CSB-Belastung im Ablauf zeigte Schwankungen zwischen $0,162$ (14. Tag) und $0,492 \text{ kg/m}^3$ (16. Tag) bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden und betrug im Mittel $0,385 \text{ kg CSB/m}^3 \pm 0,093$. Die Ablaufkonzentration schwankte zwischen $0,163 \text{ kg/m}^3$ (42. Tag) und $0,518 \text{ kg/m}^3$ (44. Tag) bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden und ergab einen Durchschnittswert von $0,368 \text{ kg CSB/m}^3 \pm 0,161$.

Die Abhängigkeit des CSB-Umsatzes im Fließbettreaktor I von der Zeit ist in Abbildung 5 graphisch dargestellt. Der CSB-Umsatz schwankte zwischen $2,30 \%$ (40. Tag) und $75,00 \%$ (14. Tag) bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden und betrug im Mittel $21,63 \% \pm 17,47$. Die Schwankungen des CSB-Umsatzes lagen zwischen $0,21 \%$ (50. Tag) und $42,26 \%$ (44. Tag) bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden und ergaben einen durchschnittlichen Wert von $10,47 \% \pm 12,62$, d.h. einen um die Hälfte geringeren Wert im Vergleich zu den CSB-Umsatzraten bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden. Der zeitliche Verlauf des CSB-Umsatzes im Fließbettreaktor II ist in Abbildung 6 zu sehen. Der CSB-Umsatz schwankte zwischen $0,23 \%$ (41. Tag) und $56,90 \%$ (15. Tag) bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden und machte im Mittel $15,20 \% \pm 13,35$ aus. Der CSB-Umsatz zeigte Schwankungen zwischen $1,71$ (44. Tag) und $63,65$ (48. Tag) bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden und betrug durchschnittlich $26,69 \% \pm 26,79$.

Abbildung 7 zeigt die graphische Darstellung der zeitlichen Abhängigkeit der CSB-Elimination im Fließbettreaktor I. Die CSB-Elimination schwankte zwischen 0,04 (5., 13., 26. und 40. Tag) und 0,69 kg/m³·d (29. Tag) bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden und machte einen Durchschnittswert von 0,21 kg CSB/m³·d \pm 0,18 aus. Die Schwankungen lagen zwischen 0,00 (50. Tag) und 0,91 kg/m³·d (44. Tag) bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden und betrug im Mittel 0,23 kg CSB/m³·d \pm 0,27. Die Änderung der Verweilzeit zeigte im Fließbettreaktor I keine signifikante Veränderung der CSB-Elimination. Der zeitliche Verlauf der CSB-Elimination im Fließbettreaktor II ist in Abbildung 8 zu sehen. Die CSB-Elimination schwankte zwischen 0,00 (34. und 41. Tag) und 1,36 kg/m³·d (15. Tag) bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden und ergab einen durchschnittlichen Wert von 0,29 kg CSB/m³·d \pm 0,29. Die Schwankungen lagen zwischen 0,04 (44. Tag) und 1,25 kg/m³·d (48. Tag) bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden. Die mittlere CSB-Elimination betrug 0,49 kg CSB/m³·d \pm 0,47.

In Abbildung 9 erkennt man, daß die Kurven von CSB-Umsatz und CSB-Elimination des Fließbettreaktors I über den gesamten Meßzeitraum sehr gut korrelieren. Abbildung 10 zeigt dasselbe Ergebnis für den Fließbettreaktor II.

Abbildung 11 zeigt die zeitliche Abhängigkeit der Raumbelastung des Fließbettreaktors I. Die Raumbelastung schwankte zwischen 0,12 (19. Tag) und 2,25 kg/m³·d (35. und 36. Tag) bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden und betrug im Mittel 1,17 kg CSB/m³·d \pm 0,64. Die Raumbelastung wies Schwankungen zwischen 1,97 (50. Tag) und 2,34 kg/m³·d (42. Tag) bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden auf und ergab einen durchschnittlichen Wert von 2,12 kg CSB/m³·d \pm 0,15. In Abbildung 12 ist der zeitliche Verlauf der Raumbelastung des Fließbettreaktors II graphisch dargestellt. Die Raumbelastung schwankte zwischen 0,82 (14. Tag) und 2,39 kg/m³·d (15. Tag) bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden und machte im Mittel 1,89 kg CSB/m³·d \pm 0,37 aus. Die Raumbelastung zeigte Schwankungen zwischen 1,56 (42. Tag) und 2,21 kg/m³·d (49. Tag) bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden und betrug durchschnittlich 2,01 kg CSB/m³·d \pm 0,24.

Abbildung 13 zeigt den CSB-Umsatz in Abhängigkeit von der Raumbelastung des Fließbettreaktors I. Der CSB-Umsatz betrug bei einer Raumbelastung von

0,12 bis 1,08 kg CSB/m³·d durchschnittlich 27,06 % ± 21,06. Der CSB-Umsatz lag bei einer Raumbelastung von 1,18 bis 2,34 kg CSB/m³·d im Mittel bei 18,66 % ± 12,92, d.h. um 46 % niedriger im Vergleich zur niedrigeren Raumbelastung. In Abbildung 14 ist die Abhängigkeit des CSB-Umsatzes von der Raumbelastung im Fließbettreaktor I graphisch dargestellt. Der CSB-Umsatz machte bei einer Raumbelastung von 0,82 bis 0,85 kg CSB/m³·d im Mittel 19,60 % ± 0,29 aus. Der CSB-Umsatz betrug bei einer Raumbelastung von 1,63 bis 2,39 kg/m³·d durchschnittlich 14,81 % ± 13,97.

In Abbildung 15 ist die Abhängigkeit der CSB-Elimination von der Raumbelastung des Fließbettreaktors I graphisch dargestellt. Die CSB-Elimination betrug bei einer Raumbelastung von 0,12 bis 1,08 kg CSB/m³·d durchschnittlich 0,11 kg/m³·d ± 0,06 und bei einer Raumbelastung von 1,18 bis 2,34 kg CSB/m³·d im Mittel 0,26 kg CSB/m³·d ± 0,23. In Abbildung 16 ist die Abhängigkeit der CSB-Elimination von der Raumbelastung des Fließbettreaktors II zu sehen. Die CSB-Elimination machte bei einer Raumbelastung von 0,82 bis 0,85 kg CSB/m³·d im Mittel 0,16 kg CSB/m³·d ± 0,01 und bei einer Raumbelastung von 1,63 bis 2,39 kg CSB/m³·d durchschnittlich 0,30 kg CSB/m³·d ± 0,30 aus.

In Abbildung 17 ist die zeitliche Abhängigkeit der CSB-Elimination und der Raumbelastung des Fließbettreaktors I graphisch dargestellt. Die Kurven korrelieren bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden gut. Die CSB Elimination vermindert sich mit sinkender Raumbelastung. Der zeitliche Verlauf von CSB-Elimination und Raumbelastung korreliert bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden vom 42. bis zum 54. Tag nicht gut. Ein Spitzenwert der CSB-Elimination von 0,91 kg CSB/m³·d wurde am 44. Tag bei einer Raumbelastung von 2,15 kg CSB/m³·d erreicht. Abbildung 18 zeigt die graphische Darstellung der CSB-Elimination und der Raumbelastung des Fließbettreaktors II von der Zeit. Die Kurven stimmen bis zum 41. Tag bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden gut überein. Bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden korreliert der zeitliche Verlauf der CSB-Elimination und Raumbelastung nicht gut.

Abbildung 19 zeigt den zeitlichen Verlauf des pH-Wertes in Zu- und Ablauf des Fließbettreaktors I. Der Zulauf-pH betrug im Mittel 7,7 ± 0,3 bei

einer Verweilzeit von 5,8 Stunden. Der Ablauf-pH ergab bei derselben Verweilzeit einen Durchschnittswert von $7,9 \pm 0,2$ und lag während dieser Versuchsphase durchschnittlich um 0,2 pH-Einheiten höher als der Zulauf-pH. Die mittleren pH-Werte für Zu- bzw. Ablauf lagen bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden bei $7,7 \pm 0,1$ bzw. $7,7 \pm 0,2$ und stimmten während dieser Versuchsphase überein. In Abbildung 20 ist die zeitliche Abhängigkeit des pH-Wertes von Zu- und Ablauf des Fließbettreaktors II graphisch dargestellt. Der Zulauf-pH ergab einen Mittelwert von $7,5 \pm 0,3$ bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden. Der Ablauf-pH lag bei derselben Verweilzeit bei einem durchschnittlichen Wert von $7,9 \pm 0,2$ und war im Mittel um 0,4 pH-Einheiten höher im Vergleich zum Zulauf-pH. Die Mittelwerte für die Zu- und Ablauf-pH-Werte bei $7,3 \pm 0,1$ bzw. $7,4 \pm 0,2$.

In Tabelle 3 bzw. 4 sind die Werte für den Gehalt an flüchtigen Fettsäuren in Zu- und Ablauf des Fließbettreaktors I bzw. II aufgelistet. Alle Proben von Zu- und Ablauf wurden auf den Gehalt an Fettsäuren mit Hilfe der Gaschromatographie untersucht.

Im Zu- und Ablauf des Fließbettreaktors I wurden folgende Konzentrationen an flüchtigen Fettsäuren gemessen.

Essigsäure wurde im Zulauf mit im Mittel $16 \text{ mg/l} \pm 24$ und im Ablauf ab dem 23. Tag mit durchschnittlich $78 \text{ mg/l} \pm 39$ bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden nachgewiesen. Bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden betrug die Zulaufkonzentration im Durchschnitt $38 \text{ mg/l} \pm 37$ und die Ablaufkonzentration im Mittel $101 \text{ mg/l} \pm 26$. Propionsäure trat im Zulauf nur am 33. und 34. Tag mit im Mittel $15 \text{ mg/l} \pm 7$ und im Ablauf ab dem 23. Tag mit im Durchschnitt $8 \text{ mg/l} \pm 9$ bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden auf. Bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden trat im Zulauf keine Propionsäure und im Ablauf ein Mittelwert von $10 \text{ mg/l} \pm 12$ auf. Die Konzentration an iso-Buttersäure im Zulauf betrug ab dem 23. Tag im Mittel $4 \text{ mg/l} \pm 5$ und im Ablauf ab dem 23. Tag im Durchschnitt $9 \text{ mg/l} \pm 5$ bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden. Im Zulauf wies man Konzentrationen von $5 \text{ mg/l} \pm 5$ und im Ablauf von $14 \text{ mg/l} \pm 7$ bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden nach. Buttersäure machte im Zulauf ab dem 23. Tag eine durchschnittliche Konzentration

von $4 \text{ mg/l} \pm 5$ und im Ablauf ab dem 23. Tag im Mittel $11 \text{ mg/l} \pm 9$ bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden aus. Bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden betrug die Zulaufkonzentration durchschnittlich $11 \text{ mg/l} \pm 14$ und die Ablaufkonzentration im Mittel $22 \text{ mg/l} \pm 10$. Es wurden Konzentrationen an Iso-Valeriansäure ab dem 23. Tag von durchschnittlich $6 \text{ mg/l} \pm 10$ im Zulauf und $14 \text{ mg/l} \pm 13$ im Ablauf ab dem 23. Tag bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden nachgewiesen. Bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden betrug der Mittelwert im Zulauf $5 \text{ mg/l} \pm 10$ und im Ablauf $26 \text{ mg/l} \pm 11$. Valeriansäure wurde im Zulauf während der gesamten Meßphase nie nachgewiesen und im Zulauf ab dem 30. Tag mit im Mittel $7 \text{ mg/l} \pm 7$ bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden und im Ablauf mit im Durchschnitt $4 \text{ mg/l} \pm 5$ bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden.

Die Gehalte an flüchtigen Fettsäuren im Zu- und Ablauf des Fließbettreaktors [I] waren folgende:

Essigsäure trat während der gesamten Meßphase bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden im Zulauf durchschnittlich mit $40 \text{ mg/l} \pm 24$ und im Ablauf mit im Mittel $82 \text{ mg/l} \pm 27$ auf. Bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden erhielt man mittlere Zulaufkonzentrationen von $48 \text{ mg/l} \pm 24$ und durchschnittliche Ablaufwerte von $73 \text{ mg/l} \pm 51$. Propionsäure trat im Zulauf während der gesamten Meßdauer bei beiden Verweilzeiten nie auf. Der Gehalt an Propionsäure betrug im Ablauf einen Mittelwert von $7 \text{ mg/l} \pm 13$ bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden und $3 \text{ mg/l} \pm 5$ bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden. Die iso-Buttersäure-Konzentration im Zulauf betrug während der gesamten Meßdauer einen Durchschnittswert von $8 \text{ mg/l} \pm 6$ bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden und im Ablauf im Mittel $10 \text{ mg/l} \pm 6$. Bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden wies man durchschnittliche iBS-Konzentrationen von $8 \text{ mg/l} \pm 4$ im Zulauf und $12 \text{ mg/l} \pm 10$ im Ablauf nach. Buttersäure trat während der gesamten Meßphase mit einer mittleren Zulaufkonzentration von $22 \text{ mg/l} \pm 15$ und einer durchschnittlichen Ablaufkonzentration von $18 \text{ mg/l} \pm 11$ bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden auf. Bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden wurde im Zulauf eine mittlere BS-Konzentration von $17 \text{ mg/l} \pm 10$ und im Ablauf von durchschnittlich $15 \text{ mg/l} \pm 14$ nachgewiesen. Der Gehalt an iso-Valeriansäure war während der gesamten Meßdauer bei einer Verweilzeit von

5,8 Stunden im Zulauf im Mittel $17 \text{ mg/l} \pm 14$ und im Ablauf durchschnittlich $20 \text{ mg/l} \pm 14$. Bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden betrug die mittlere Konzentration an iVS im Zulauf $17 \text{ mg/l} \pm 10$ und im Ablauf $17 \text{ mg/l} \pm 11$. Valeriansäure trat im Zulauf mit durchschnittlich $2 \text{ mg/l} \pm 5$ und im Ablauf mit im Mittel $3 \text{ mg/l} \pm 5$ bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden auf. Bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden betrug der Gehalt an VS im Zulauf einen Mittelwert von $2 \text{ mg/l} \pm 4$ und im Ablauf einen Durchschnittswert von $3 \text{ mg/l} \pm 5$.

Foto 1 zeigt freischwimmende Stäbchenbakterien des Fließbettreaktors I am 33. Tag. Die Stäbchenbakterien bilden zum Teil Ketten. Die Gramfärbung der Bakterien beider Fließbettreaktoren ergab gramnegative Stäbchenbakterien. In Foto 2 sieht man eine Bakterienflocke aus Matrix und Stäbchenbakterien aus dem Fließbettreaktor I am 33. Tag.

In Abbildung 23 sind die Schwankungen der Gesamtindividuen-dichte der Protozoen im Fließbettreaktor I gegen die Zeit graphisch aufgetragen. Die mikroskopische Auszählung mit Hilfe einer Thomakammer begann am 34. Tag. Das Flagellentierchen *Histomonas meleagridis* trat als einzige Protozoenart während der gesamten Meßphase bei einer durchschnittlichen Temperatur von $13,3 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,9$ und einem mittleren O_2 -Gehalt von $0,3 \text{ mg/l} \pm 0,1$ im Fließbettreaktor I auf. Die Bestimmung wurde nach KUDO 1954 durchgeführt.

Stamm: Protozoa GOLDFUSS
Unterstamm: Plasmodroma DOFLEIN
Klasse: Mastigophora DIESING
Unterklasse: Zoomastigina DOFLEIN
Ordnung: Rhizomastigina BOTSCHLI
Familie: Mastigamoebidae
Gattung: *Histomonas* TYZZER
Art: *Histomonas meleagridis* SMITH (*Amoeba meleagridis* SMITH)

Foto 3 zeigt *Histomonas meleagridis* in abgekugelter Form am Rande einer Bakterienflocke am 33. Tag der Meßphase.

Histomonas meleagridis ist ein aktiv amöboider, meist abgerundeter, manchmal länglicher Flagellat mit einer feinen Geißel. Die Schätzwerte mit Hilfe der Thoma-Kammer ergaben Abmessungen von 17-25 μm Länge und 17 μm Dicke. Die Messungen konnten wegen der wechselnden Form des Einzellers nicht exakt durchgeführt werden. Im Cytoplasma befinden sich ein Kern und Nahrungsvakuolen. Diese Protozoenart wurde freischwimmend oder am Rande der Bakterienflocke anhaftend angesehen. Die freischwimmenden Individuen können auch rotierende Bewegungen ausführen.

Die Individuendichte schwankte zwischen 53.750 (36. Tag) und 1.045.000 Individuen/ml (40. Tag) bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden und betrug im Mittel 402.290 Individuen/ml \pm 337.270. Die Gesamtindividuenzahl zeigte Schwankungen zwischen 131.250 (42. Tag) und 935.000 Individuen/ml (54. Tag) bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden und war durchschnittlich 428.050 Individuen/ml \pm 267.700.

Abbildung 24 zeigt die zeitliche Veränderung der Gesamtindividuenzahl der Protozoen im Fließbettreaktor II in graphischer Darstellung. *Histomonas meleagridis* trat auch in diesem Wirbelschichtreaktor als einzige Protozoenart bei einer mittleren Temperatur von 17,9 $^{\circ}\text{C}$ \pm 0,5 und einem durchschnittlichen O_2 -Gehalt von 0,2 mg/l \pm 0,1 auf. Die Individuendichte schwankte zwischen 7.500 Individuen/ml (16. Tag) und 351.250 Individuen/ml (10. Tag) bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden und betrug im Durchschnitt 92.900 Individuen/ml \pm 95.390. Die Gesamtindividuenzahl wies Schwankungen zwischen 26.250 Individuen/ml (44. Tag) und 52.500 Individuen/ml (48. Tag) bei einer Verweilzeit von 2,0 Stunden auf und ergab einen Mittelwert von 41.500 Individuen/ml \pm 10.730.

4. DISKUSSION

Der anaerobe Abbau von häuslichem Abwasser mit Hilfe von Fließbettreaktoren wurde bei niedrigen Temperaturverhältnissen (13,9 $^{\circ}\text{C}$ und 17,9 $^{\circ}\text{C}$) und niedrigen Verweilzeiten (2,0 und 5,8 Stunden) untersucht. Die CSB-Belastungen der beiden, geprüften Wirbelschichtreaktoren schwankten zwischen 0,030 und 0,580 $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ und ergaben einen Mittelwert von 0,405 $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$.

Der Einfluß von Verweilzeit- und Temperaturänderung auf den CSB-Umsatz konnte nicht eindeutig erkannt werden, da bei den Ergebnissen hohe Standardabweichungen von im Mittel 97 % auftraten. Es wurde jedoch ein mittlerer CSB-Umsatz von 18,55 % für beide Temperaturverhältnisse und beide Verweilzeiten festgestellt werden. In der Vorstudie (Projekt-Nr. 309/U86156 vom Juni 1987) wurden bei Raumtemperatur und einer hydraulischen Retentionszeit von 5,8 Stunden 23,3 % CSB-Umsatz in der Meßphase vom 1. bis zum 54. Tag erreicht.

Die mittlere Standardabweichung bei den Meßwerten der CSB-Elimination war 99 %, sodaß eine exakte Aussage über den Einfluß der Temperatur und der Verweilzeit nicht möglich ist. Die CSB-Elimination lag für beide Verweilzeiten und beide, niedrigen Temperaturverhältnisse im Mittel bei $0,30 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$.

Der durchschnittliche Wert für den CSB-Umsatz machte bei einer Raumbelastung bis $1,0 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$ für beide Temperaturbedingungen 23,33 % bei einer mittleren Standardabweichung von 10,67 % und bei einer Raumbelastung von $1,0$ bis $2,3 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$ 14,73 % aus, wobei bei diesem Wert die Standardabweichung bei 13,39 % lag. Die Vorstudie (Projekt-Nr. 309/U86156) ergab, daß die Raumbelastung nicht über $2 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$ bei Raumtemperatur ansteigen sollte, da bei höheren Raumbelastungen der CSB-Umsatz stark zurückgeht.

Die CSB-Elimination betrug bei einer Raumbelastung bis $1,0 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$ im Mittel $0,13 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$ mit einer mittleren Standardabweichung von 30 % und bei einer Raumbelastung von $1,0$ bis $2,3 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$ im Durchschnitt bei $0,28 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$ bei einer mittleren Standardabweichung der Werte von 94 %.

Der pH-Wert im Ablauf wurde durch das Auftreten von Fettsäuren bei beiden Fließbettreaktoren nicht in den sauren Bereich verschoben. Der pH im Ablauf lag bei einer Temperatur von $13,9 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer Verweilzeit von 5,8 Stunden im Mittel um 0,2 pH-Einheiten und bei einer Temperatur von $17,9 \text{ }^\circ\text{C}$ um im Durchschnitt 0,4 pH-Einheiten höher als der Zulauf. In beiden Reaktoren ergaben sich fast identische pH-Werte für Zu- und Ablauf bei einer

Verweilzeit von 2,0 Stunden und für beide Temperaturen. Die Literaturstelle von SWITZENBAUM et al., 1984 beschreibt höhere pH-Werte im Ablauf im Vergleich zu den Zulauf-pH-Werten. Der pH im Ablauf bei einer Abwassertemperatur von 17 °C bis 26,5 °C und einem löslichen CSB von durchschnittlich 110,76 mg/l (24-328 mg/l SCOD) war im Mittel um 0,28 höher als im Zulauf.

Im Zu- und Ablauf beider untersuchten Wirbelschichtreaktoren traten die flüchtigen Fettsäuren Essigsäure, Propionsäure, iso-Buttersäure, Buttersäure, iso-Valeriansäure und Valeriansäure auf. Im Fließbettreaktor I waren erst ab dem 23. Tag flüchtige Fettsäuren im Zu- und Ablauf bei einer Verweilzeit von 5,8 Stunden zu messen. Eine Ausnahme bildete die Essigsäure, die im Zulauf während der gesamten Meßphase auftrat. Im Fließbettreaktor II traten die Fettsäuren während der gesamten Meßdauer auf. Im Ablauf traten bei beiden Temperaturbedingungen Mittelwerte für die Essigsäure von 83 mg/l (mittlere Standardabweichung der Ergebnisse: 45 %), für die Propionsäure von 7 mg/l (mittlere Standardabweichung der Werte: 146 %), für die iso-Buttersäure von 11 mg/l (mittlere Standardabweichung der Ergebnisse: 62 %), für die Buttersäure 16 mg/l (mittlere Standardabweichung der Werte: 70 %), für die iso-Valeriansäure 19 mg/l (mittlere Standardabweichung der Ergebnisse: 67 %) und für die Valeriansäure 4 mg/l (mittlere Standardabweichung der Ergebnisse: 140 %). Die Änderung der Verweilzeit und der Temperatur wirkten sich nicht auf den Gehalt an flüchtigen Fettsäuren im Ablauf beider Fließbettreaktoren aus. Bei der Vorstudie (Projekt-Nr. 309/U86156 vom Juni 1987) trat bei Raumtemperatur nur Essigsäure auf. Die Zunahme der Essigsäurekonzentration wies darauf hin, daß die methanogenen Bakterien noch nicht voll entwickelt waren.

Die Stäbchenbakterien waren gramnegative Mikroorganismen. Das Flagellentierchen *Histomonas meleagridis* trat als einzige Protozoenart bei beiden Fließbettreaktoren auf. Der Temperaturbereich lag bei 13,9 °C bis 17,9 °C, der O₂-Gehalt zwischen 0,2 und 0,3 mg/l und der pH im Zulauf zwischen 7,3 und 7,7. Die Individuendichte betrug bei einer Temperatur von 13,9 °C im Durchschnitt 415.170 Individuen/ml mit einer mittleren Standardabweichung

von 73 %. Die Änderung der Verweilzeit hatte keinen Einfluß auf die Gesamtindividuenzahl. Bei einer Fließbetttemperatur von 17,9 °C erhielt man mittlere Werte für die Gesamtindividuenzahl von 67.200 Individuen/ml, wobei die Standardabweichung der Ergebnisse im Mittel 64 % betrug. Die Individuendichte von *Histomonas meleagridis* lag demnach bei der um 4 °C höheren Temperatur um 84 % niedriger im Vergleich zur Temperatur von 13,9 °C.

Bei der aeroben Abwasserbehandlung lassen typische Leitorganismen innerhalb der Protozoenpopulation auf die Abbauleistungen rückschließen. Es bleibt die Frage offen, inwieweit dies auch bei der anaeroben Abwasserreinigung anhand von Indikatororganismen der Protozoenfauna möglich ist. Ein Anhaltspunkt ist durch die Studie an *Histomonas meleagridis* gegeben.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Der anaerobe Abbau von häuslichem Abwasser wurde in zwei Wirbelschichtreaktoren im Labormaßstab bei niedrigen Verweilzeiten (2,0 und 5,8 Stunden) und geringen Temperaturen (13,9 und 17,9 °C) untersucht. Der mittlere CSB-Umsatz betrug 18,55 % und die durchschnittliche CSB-Elimination 0,30 kg/m³·d bei beiden Temperaturbedingungen und Verweilzeiten. Der CSB-Umsatz lag bei einer Raumbelastung von 1,0 bis 2,3 kg/m³·d um das 1,6-fache niedriger im Vergleich zur Raumbelastung bis 1,0 kg/m³·d. Die CSB-Elimination war bei einer Raumbelastung von 1,0 bis 2,3 kg/m³·d um das 2,1-fache höher verglichen mit der Raumbelastung bis 1,0 kg/m³·d. Der pH-Wert im Ablauf lag höher als der im Zulauf und wurde durch das Auftreten von flüchtigen Fettsäuren nicht in den sauren Bereich verschoben. Essigsäure trat mit im Mittel 83 mg/l in der höchsten Konzentration im Vergleich zu den anderen, flüchtigen Fettsäuren auf. Die Änderung der Verweilzeit und der Temperatur zeigte keine signifikante Auswirkung auf den Gehalt an Fettsäuren im Ablauf. In beiden Fließbettreaktoren trat während der gesamten Meßdauer nur die Protozoenart *Histomonas meleagridis* auf.

Die Vorbehandlung von häuslichem Abwasser bei niedrigen Verweilzeiten und niedrigen Temperaturen ist grundsätzlich möglich. Der CSB-Umsatz wird

dabei verglichen mit einem anaeroben Abbau bei Raumtemperatur nicht erheblich vermindert. Signifikante Auswirkungen durch die Änderung der Verweilzeit und der Temperatur lassen sich erst bei verlängerter Meßdauer über einige Monate erkennen. Die Beurteilung der Protozoenart *Histomonas meleagridis* als Leitorganismus in der anaeroben Abwasserbehandlung muß erst näher untersucht werden.

6. LITERATUR

GENUNG, R.K.; HARRIS, M.T.; RIVERA, A.L.; DONALDSON, T.L.: "Operation of an upflow fixed-bed anaerobic digester for waste-stabilization and fuel gas production at near-commercial scale"; *Energy Biomass Wastes* 7th, 1983, pp. 647-670.

MEIJNER, J.J.: "Technik der anaeroben Abwasserreinigung"; *Chem.-Ing.-Tech.*, Vol. 56, No. 7, 1984, pp. 526-532.

JEWELL, W.J.: "Anaerobic sewage treatment - Fifth of a six-part series on wastewater treatment processes"; *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 21, No. 1, 1987, pp. 14-21.

JEWELL, W.J. & MORRIS, J.W.: "Influence of varying temperature, flowrate and substrate concentration on the anaerobic attached-film expanded-bed process"; *Proceedings of the 36th Industrial Waste Conference*, 1981, pp. 655-664.

JEWELL, W.J.; SWITZENBAUM, M.S.; MORRIS, J.W.: "Municipal wastewater treatment with the anaerobic attached microbial film expanded bed process"; *Journal WPCF*, Vol. 53, No. 4, 1981, pp. 482-490.

KAHL, A.: "Urtiere oder Protozoa"; 18. Teil, 1: Wimpertiere oder Ciliata (Infusoria) in: DAHL, F.: "Die Tierwelt Deutschlands und der angrenzenden Meerestelle"; Gustav Fischer Verlag, Jena 1930.

KANGATHARALINGAM, N. & FERGUSON, M.W.: "A simple and rapid technique for fluorescence staining of fungal nuclei"; *Current Microbiology*, Vol. 10, 1984, pp. 99-104.

KUDO, R.R.: "Protozoology"; Fourth Edition, Charles C. Thomas-Publisher, Springfield, Illinois, USA, September, 1954.

LETTINGA, G.; ROERSMA, R.; BRIN, P.: "Anaerobic treatment of raw domestic sewage at ambient temperatures using a granular bed UASB reactor"; Biotechnology and Bioengineering, Vol. 25, No. 7, 1983, pp. 1701-1723.

SWITZENBAUM, M.S. & JEWELL, W.J.: "Anaerobic attached-film expanded-bed reactor treatment"; Journal WPCF, Vol. 52, No. 7, 1980, pp. 1953-1955.

SWITZENBAUM, M.S.; SHEEHAN, K.C.; HICKEY, R.F.: "Anaerobic treatment of primary effluent"; Environmental Technology Letters, Vol. 5, No. 5, 1984, pp. 189-200.

YOUNG, J.C. & McCARTY, P.L.: "The Anaerobic Filter for Waste Treatment"; Journal WPCF, Vol. 41, No. 5 (2), 1969, p. 160.

7. ABBILDUNGEN, TABELLEN, FOTOS

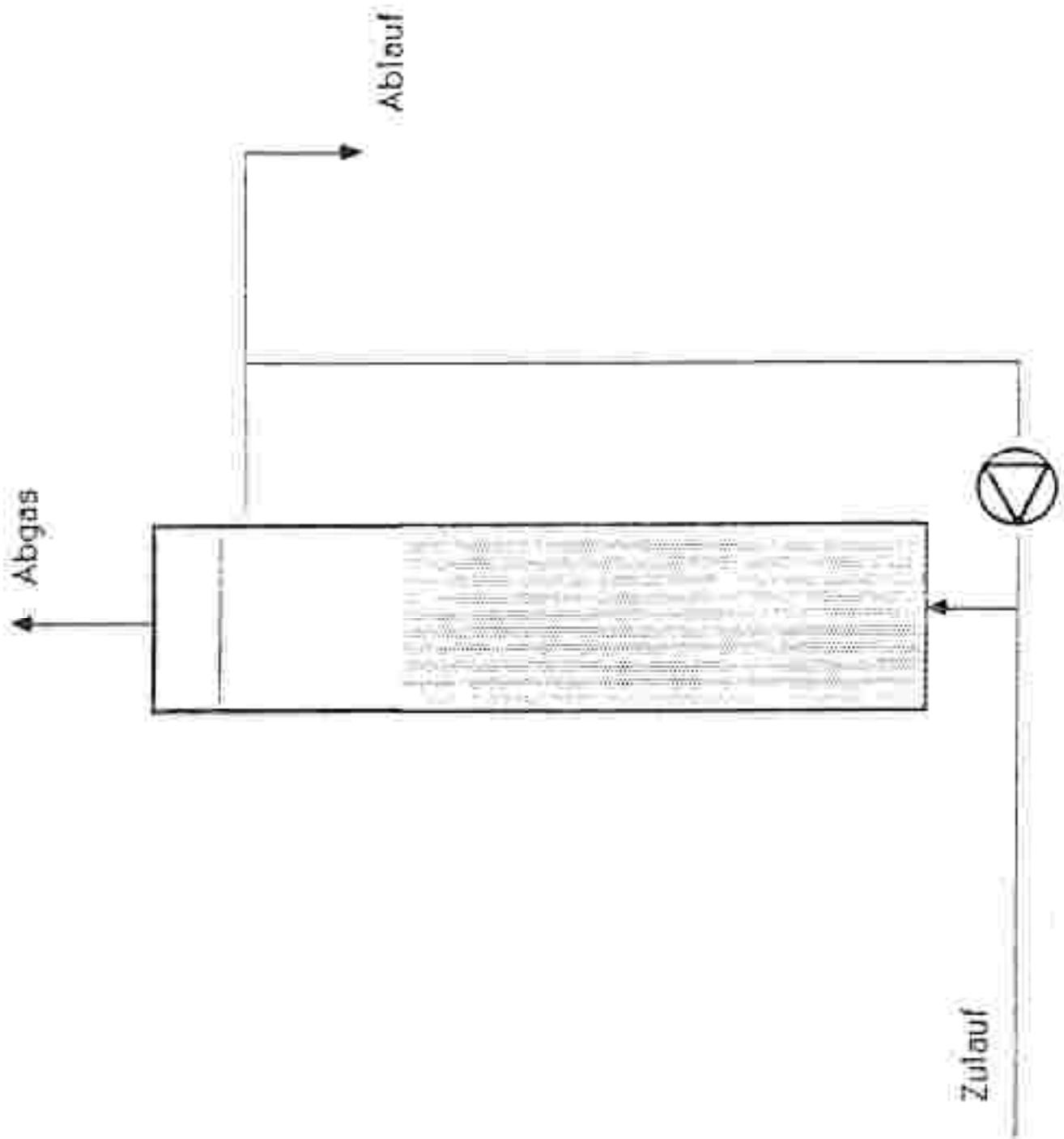


Abbildung 1: Versuchsanordnung des Fließbettreaktors im Labormaßstab

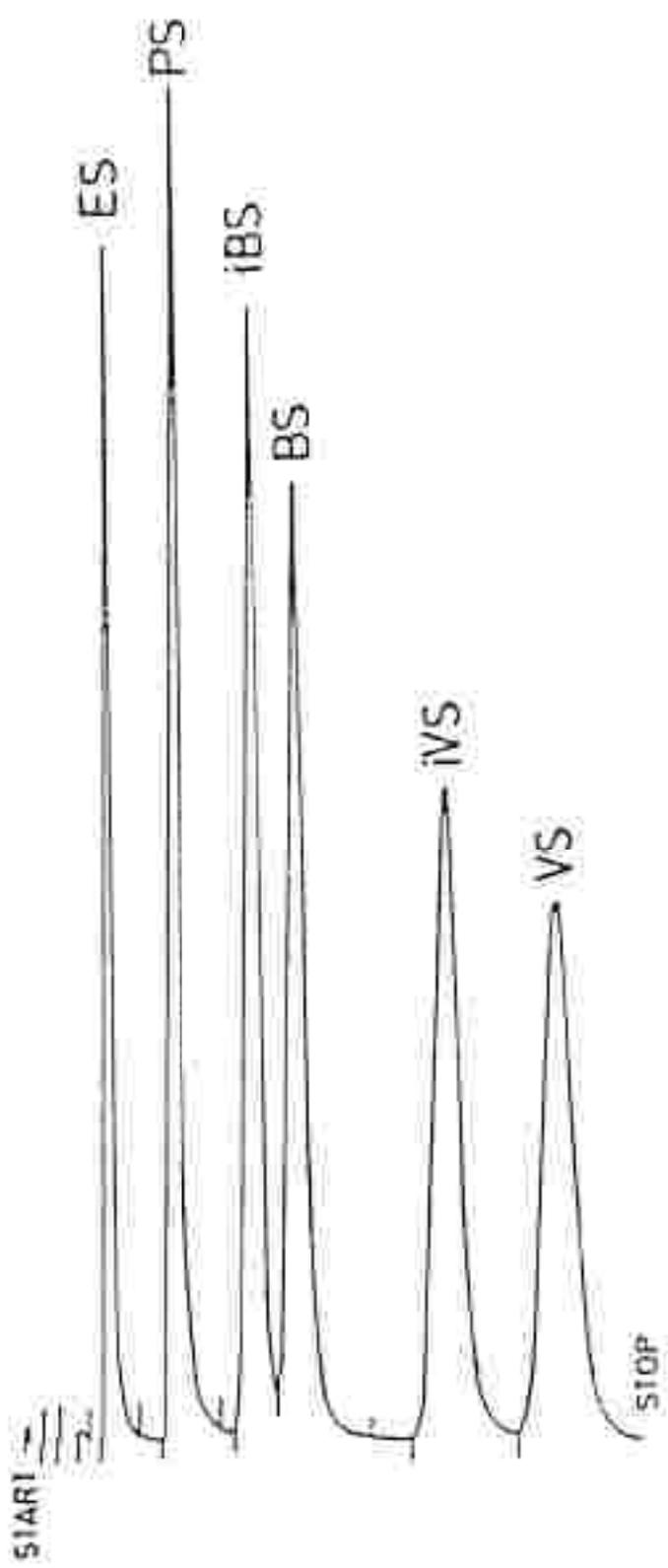


Abbildung 2: Chromatogramm eines Fettsäurestandardgemisches. Trennung von Essigsäure (ES), Propionsäure (PS), iso-Buttersäure (iBS), Buttersäure (BS), iso-Valeriansäure (iVS), Valeriansäure (VS).

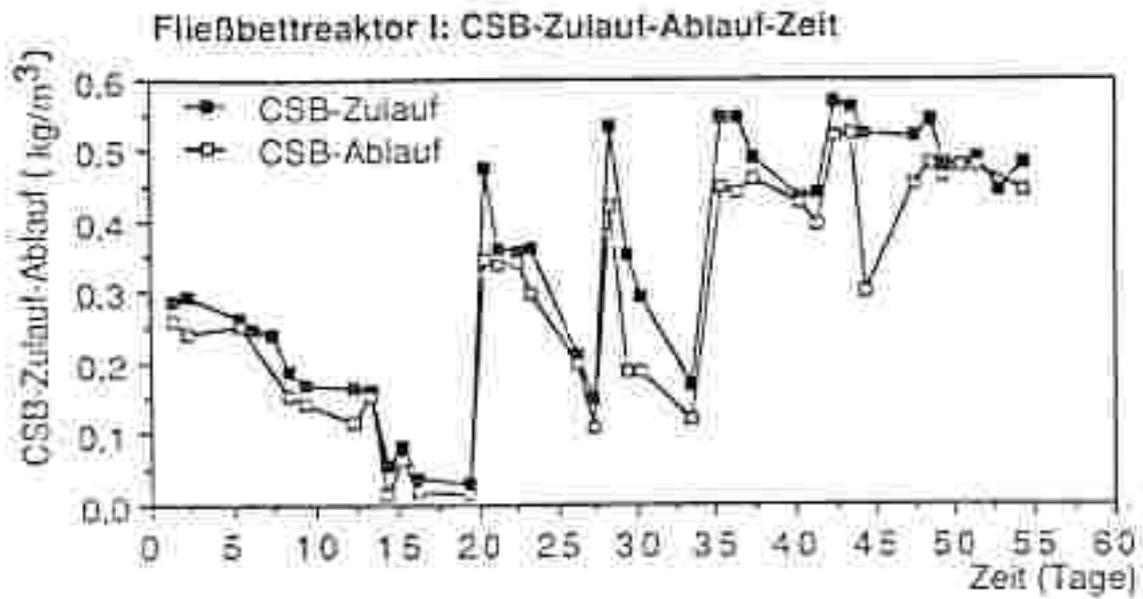


Abbildung 3: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor I: CSB-Konzentrationen (kg/m^3) von Zu- und Ablauf, Tag 1 bis Tag 54.

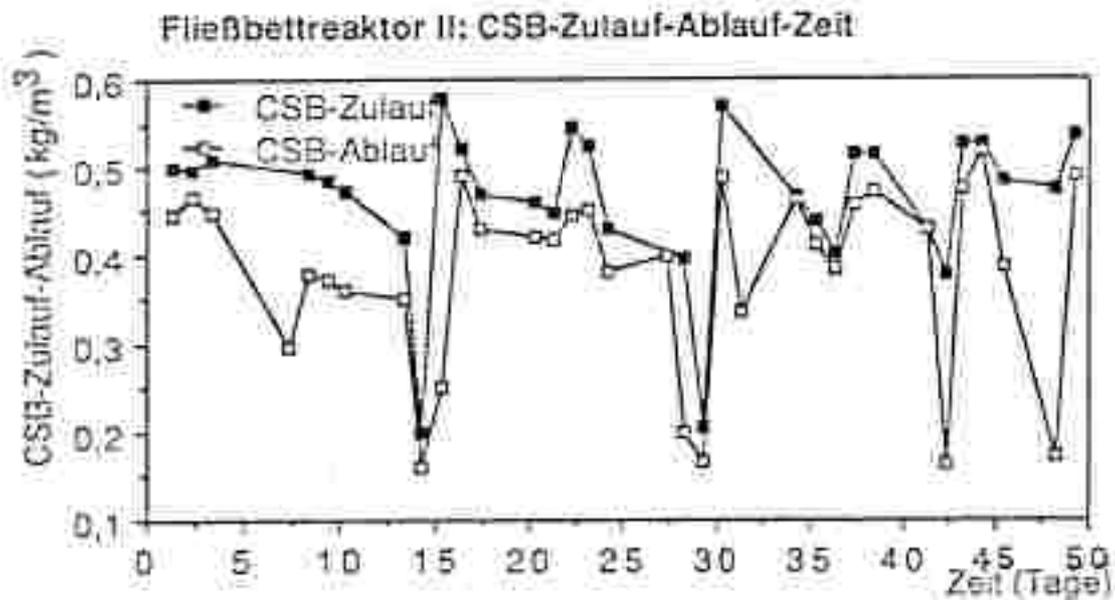


Abbildung 4: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor II: CSB-Konzentrationen (kg/m^3) von Zu- und Ablauf, Tag 1 bis Tag 49.

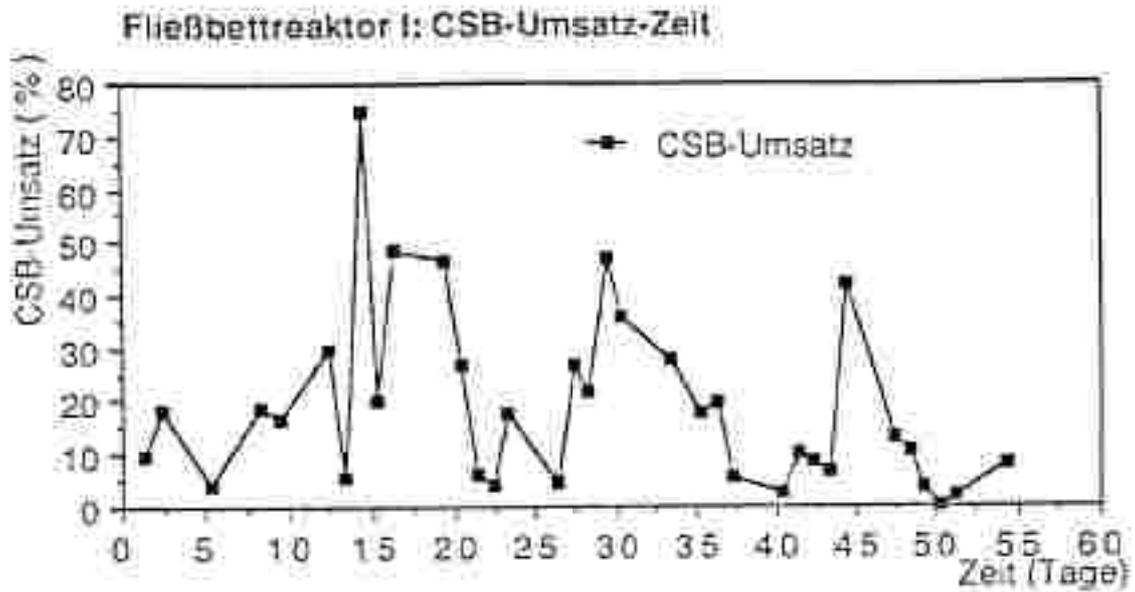


Abbildung 5: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor I: CSB-Umsatz (%) von Tag 1 bis Tag 54.

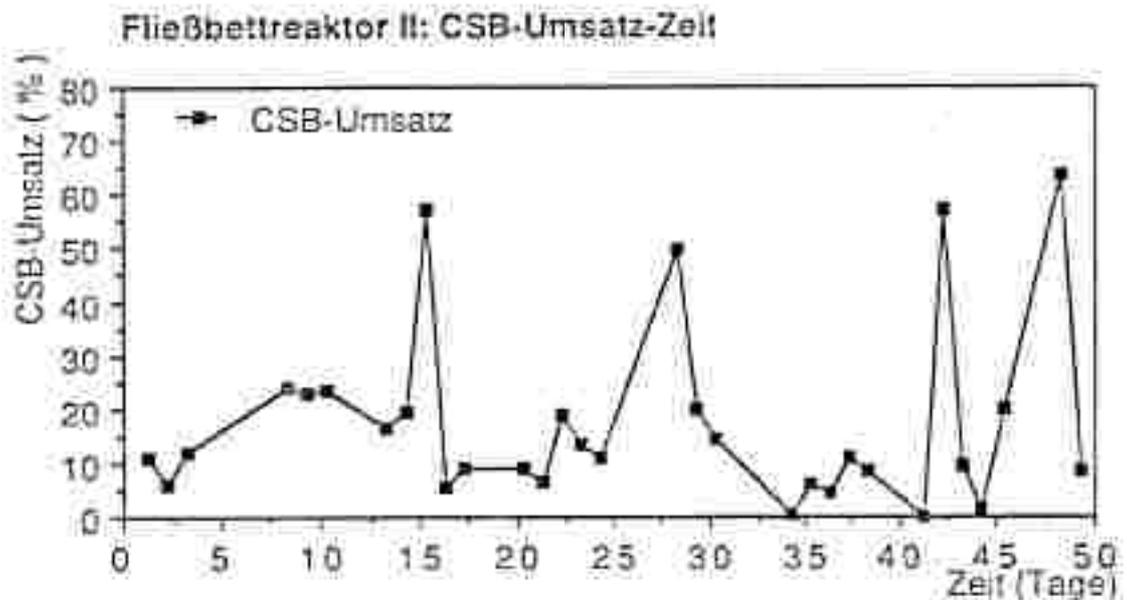


Abbildung 6: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor II: CSB-Umsatz (%) von Tag 1 bis Tag 49.

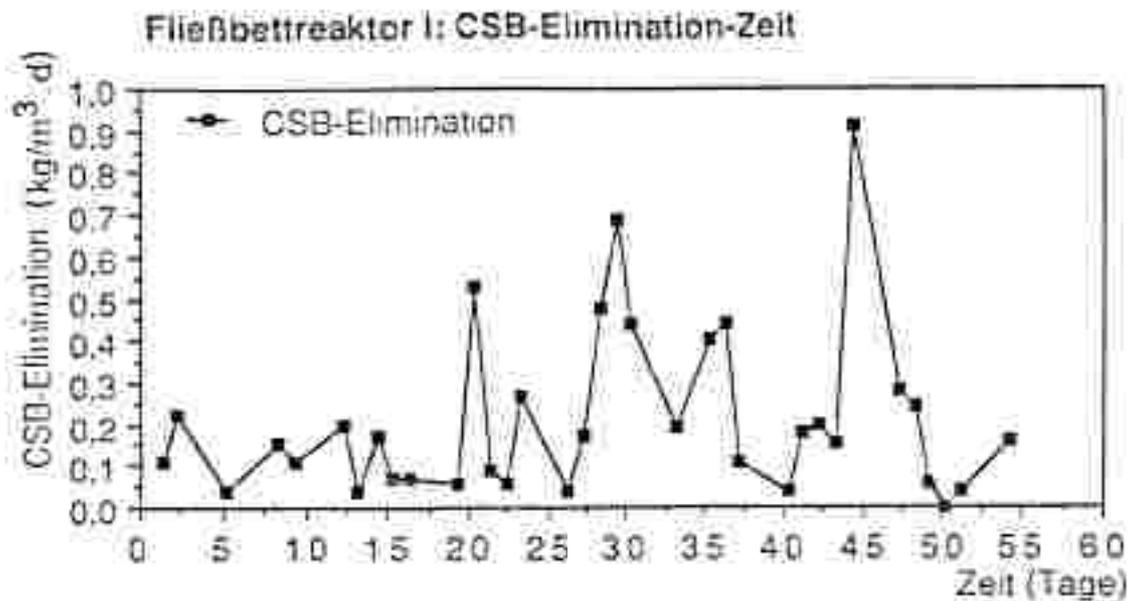


Abbildung 7: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor I: CSB-Elimination (kg/m³·d) von Tag 1 bis Tag 54.

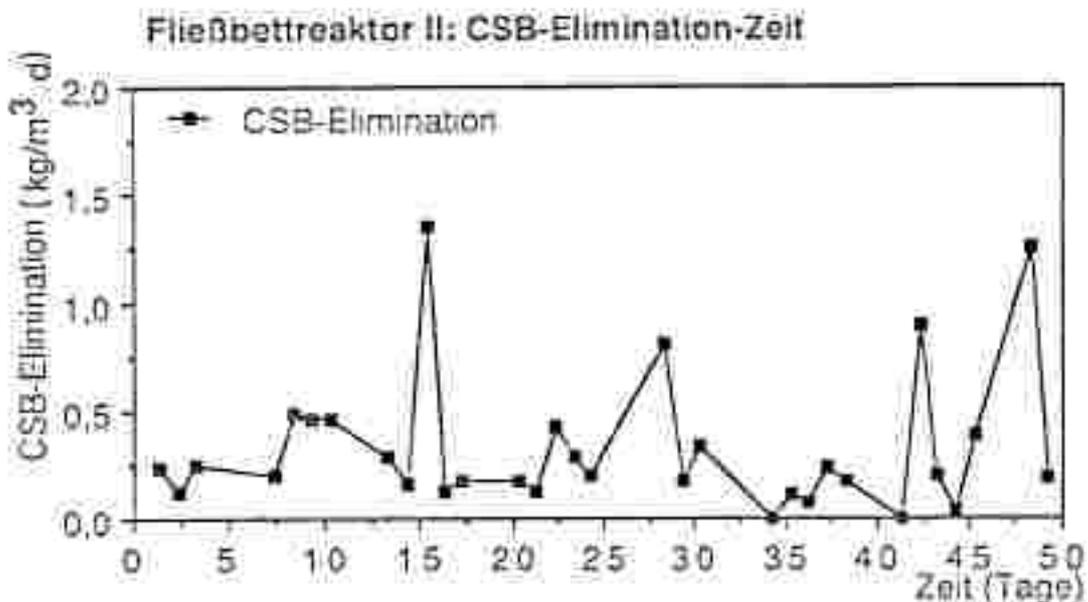


Abbildung 8: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor II: CSB-Elimination (kg/m³·d) von Tag 1 bis Tag 49.

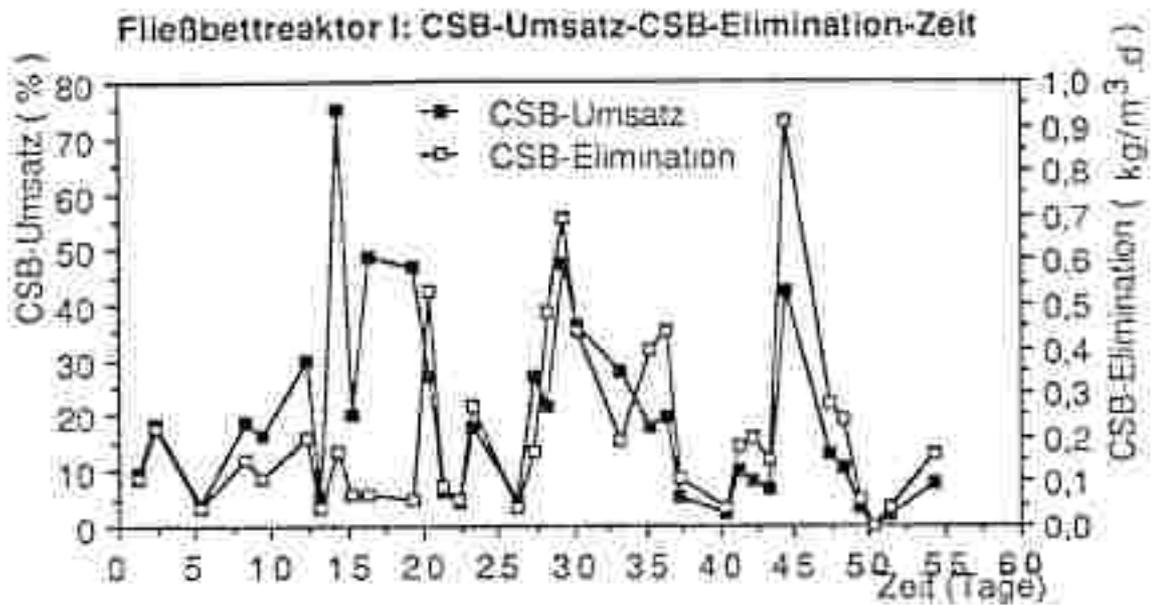


Abbildung 9: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor I: CSB-Umsatz (%) und CSB-Elimination ($\text{kg/m}^3 \cdot \text{d}$) von Tag 1 bis Tag 54.

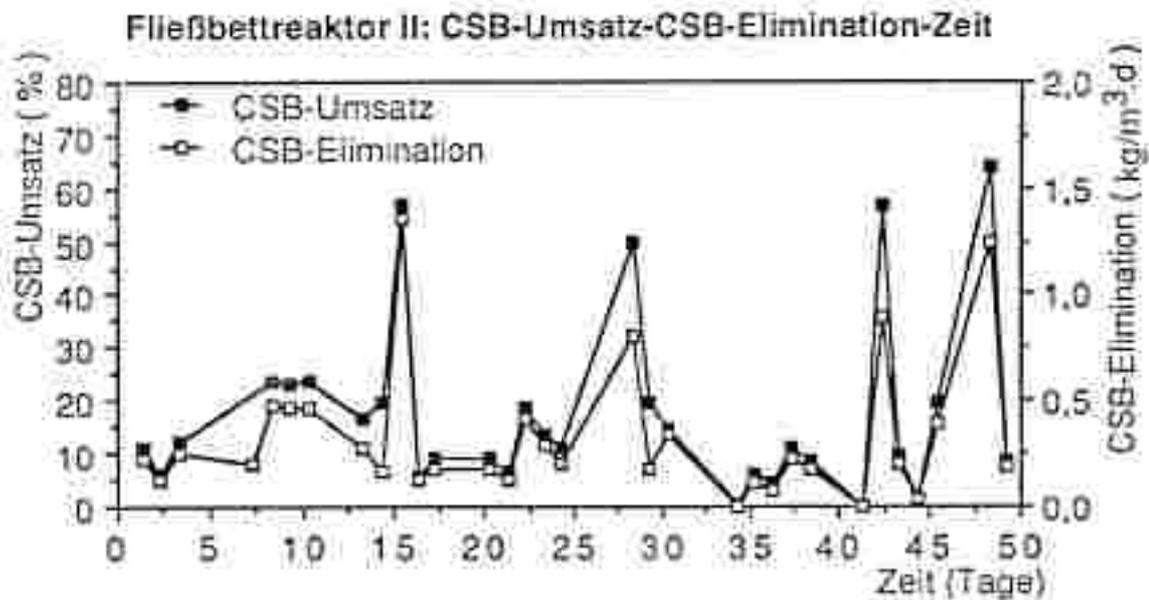


Abbildung 10: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor II: CSB-Umsatz (%) und CSB-Elimination ($\text{kg/m}^3 \cdot \text{d}$) von Tag 1 bis Tag 49.

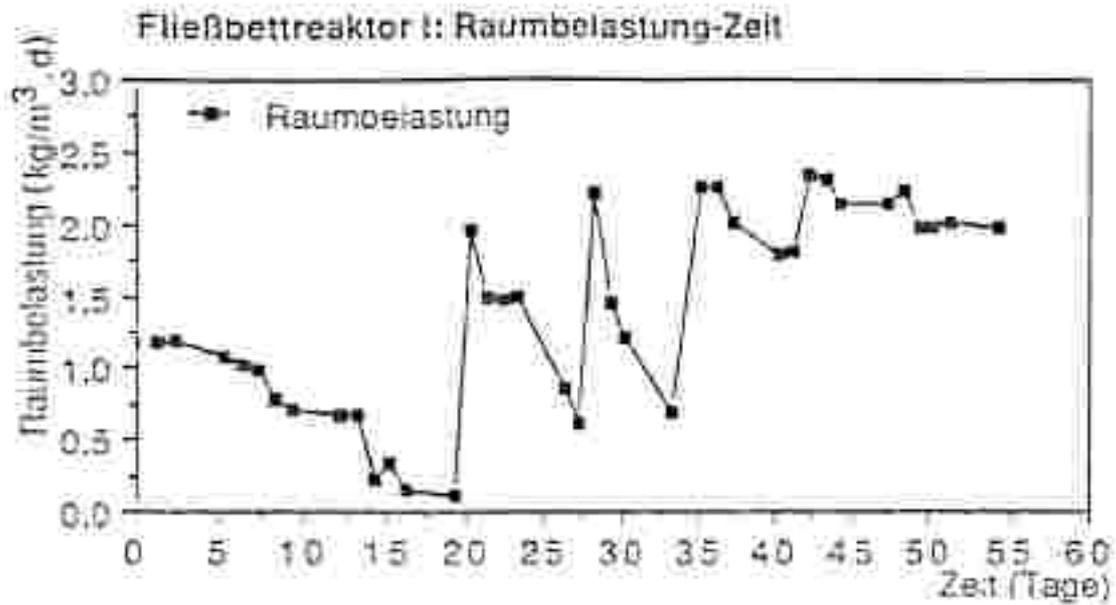


Abbildung 11: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor I: Raumbelastung (kg/m³·d) von Tag 1 bis Tag 54.

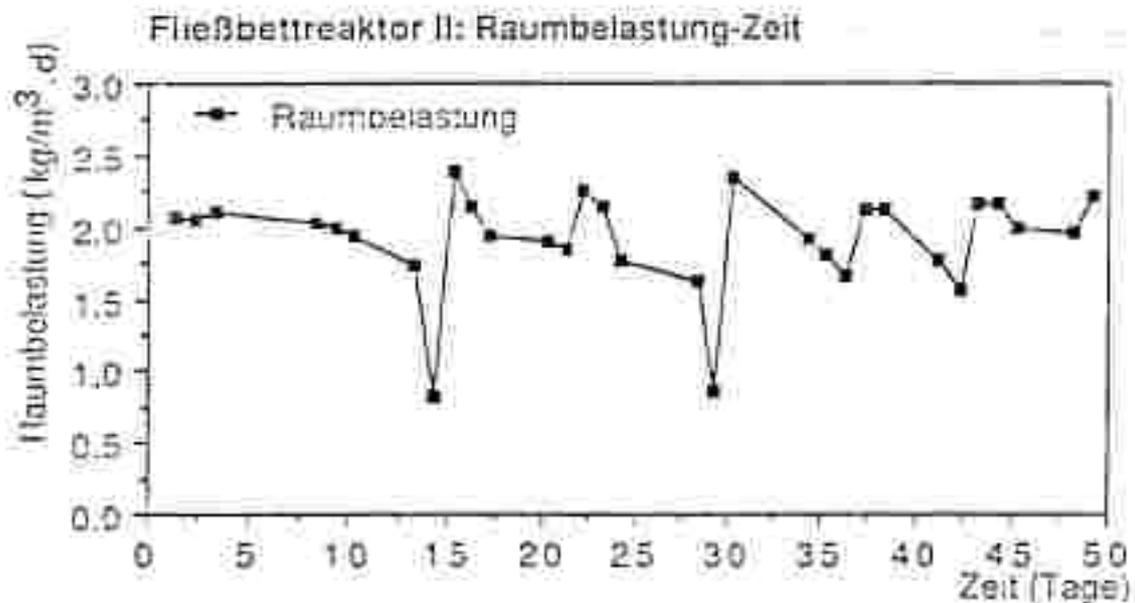


Abbildung 12: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor II: Raumbelastung (kg/m³·d) von Tag 1 bis Tag 49.

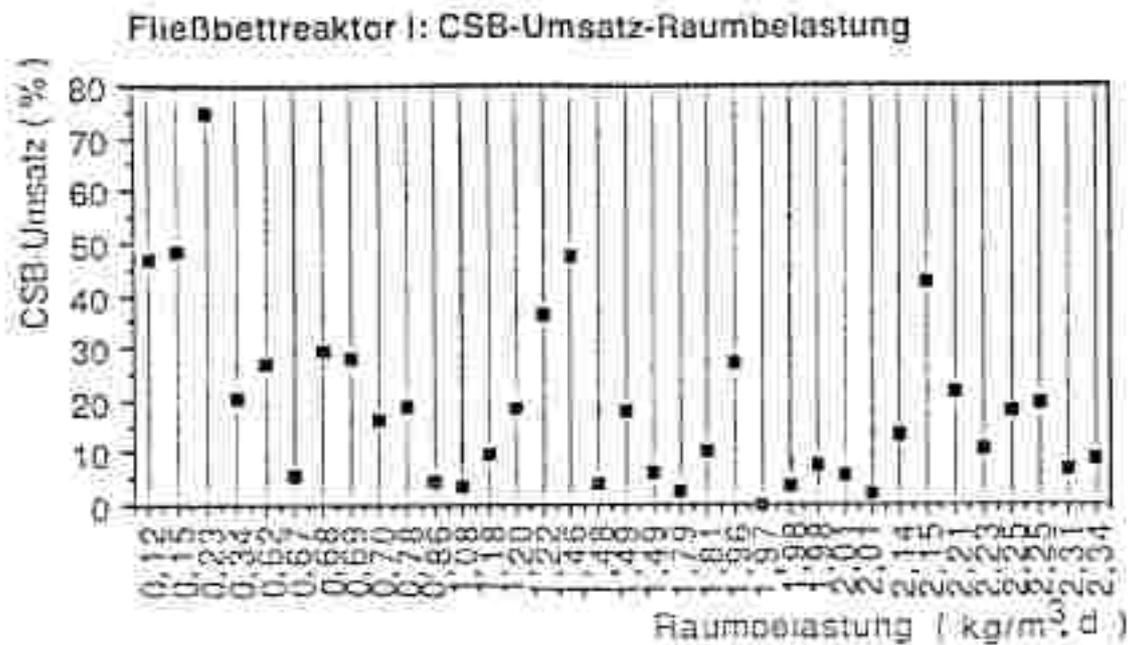


Abbildung 13: Anaerobe Vorrreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor I: CSB-Umsatz (%) in Abhängigkeit von der Raumbelastung (kg/m³·d).

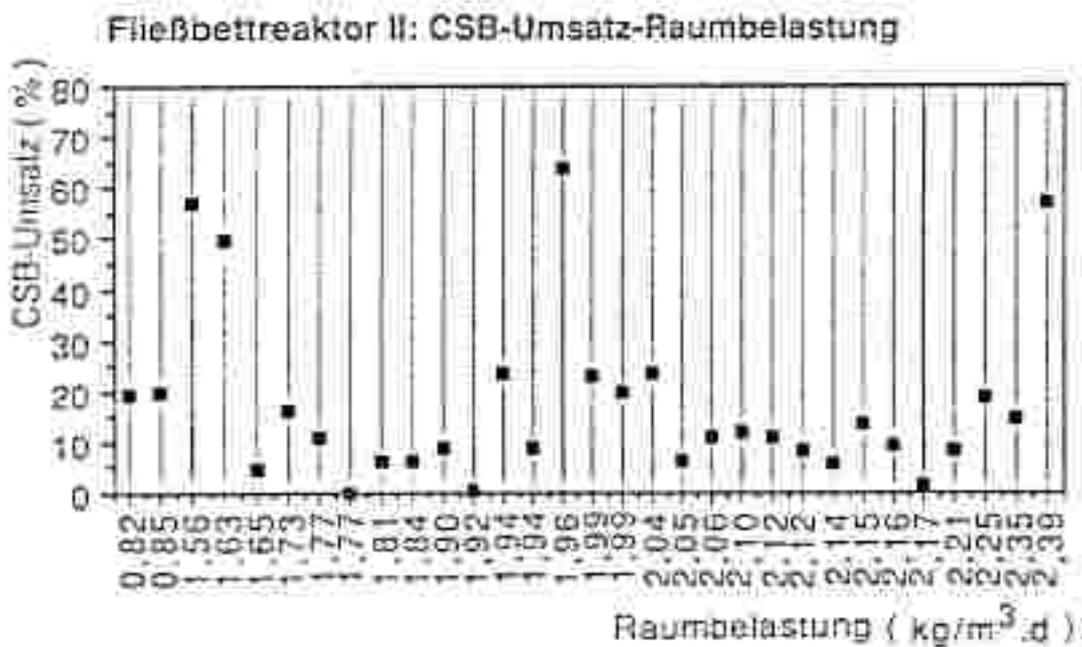


Abbildung 14: Anaerobe Vorrreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor II: CSB-Umsatz (%) in Abhängigkeit von der Raumbelastung (kg/m³·d).

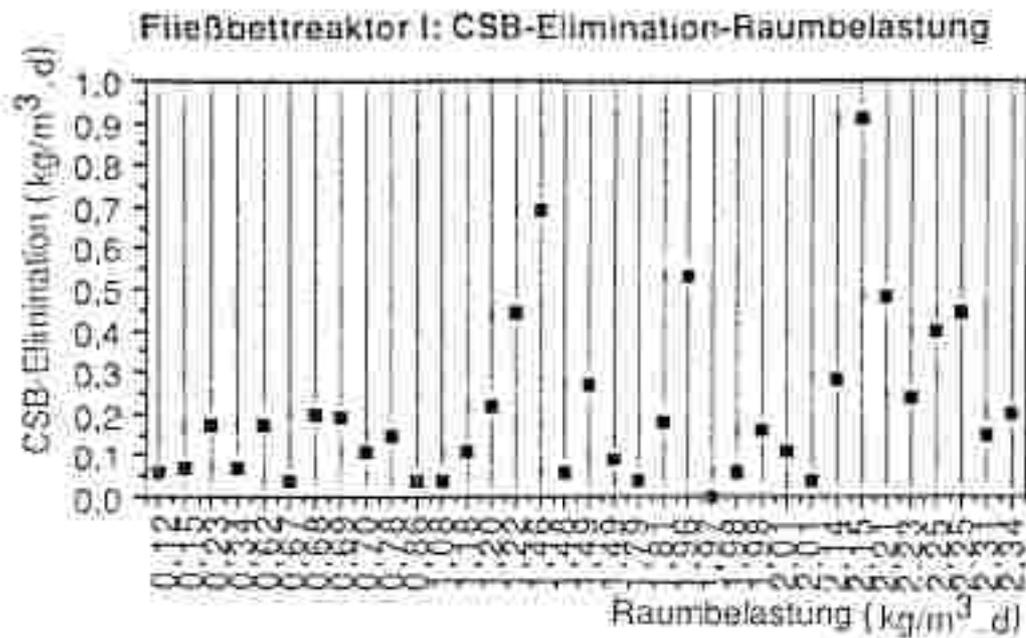


Abbildung 15: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor I: CSB-Elimination (kg/m³·d) in Abhängigkeit von der Raumbelastung (kg/m³·d).

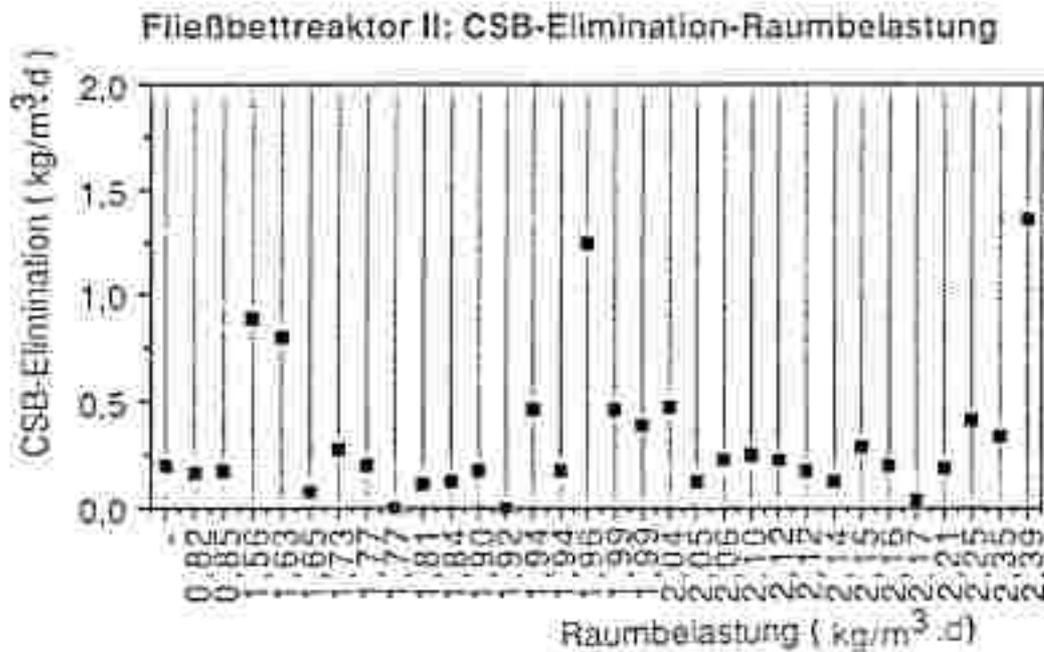


Abbildung 16: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor II: CSB-Elimination (kg/m³·d) in Abhängigkeit von der Raumbelastung (kg/m³·d).

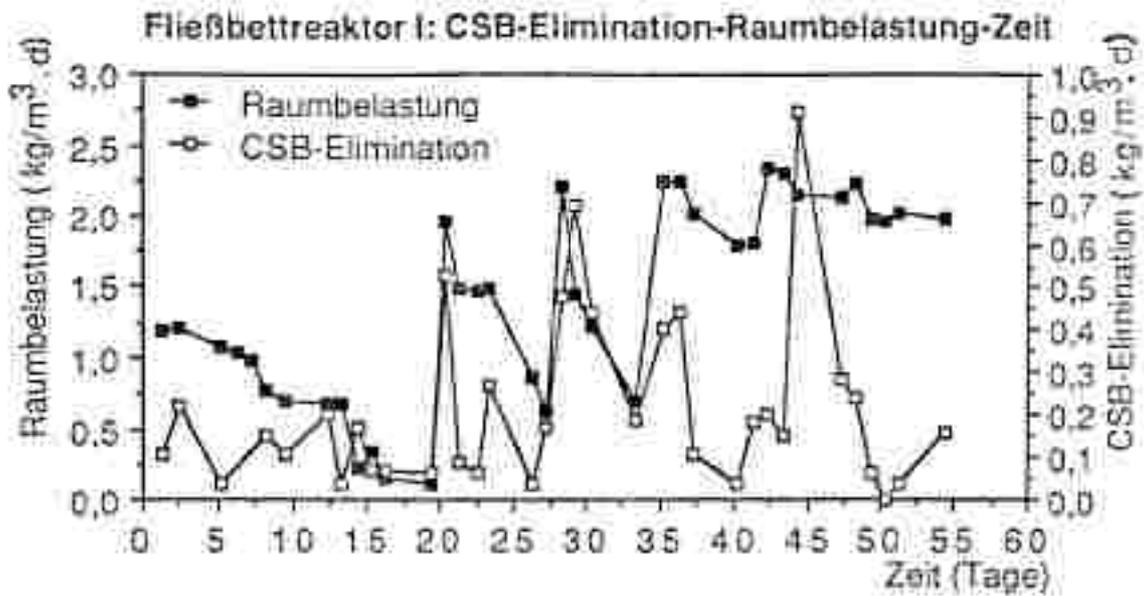


Abbildung 17: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor I: CSB-Elimination ($\text{kg/m}^3\cdot\text{d}$) und Raumbelastung ($\text{kg/m}^3\cdot\text{d}$) von Tag 1 bis Tag 54.

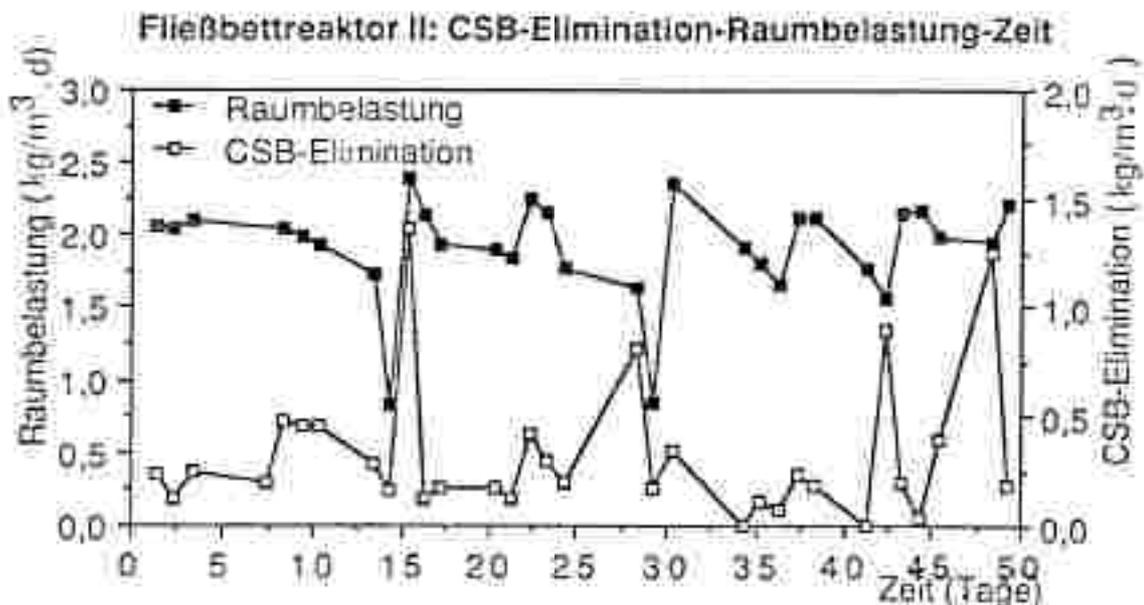


Abbildung 18: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor II: CSB-Elimination ($\text{kg/m}^3\cdot\text{d}$) und Raumbelastung ($\text{kg/m}^3\cdot\text{d}$) von Tag 1 bis Tag 49.

Fließbettreaktor I: pH-Zulauf-Ablauf-Zeit

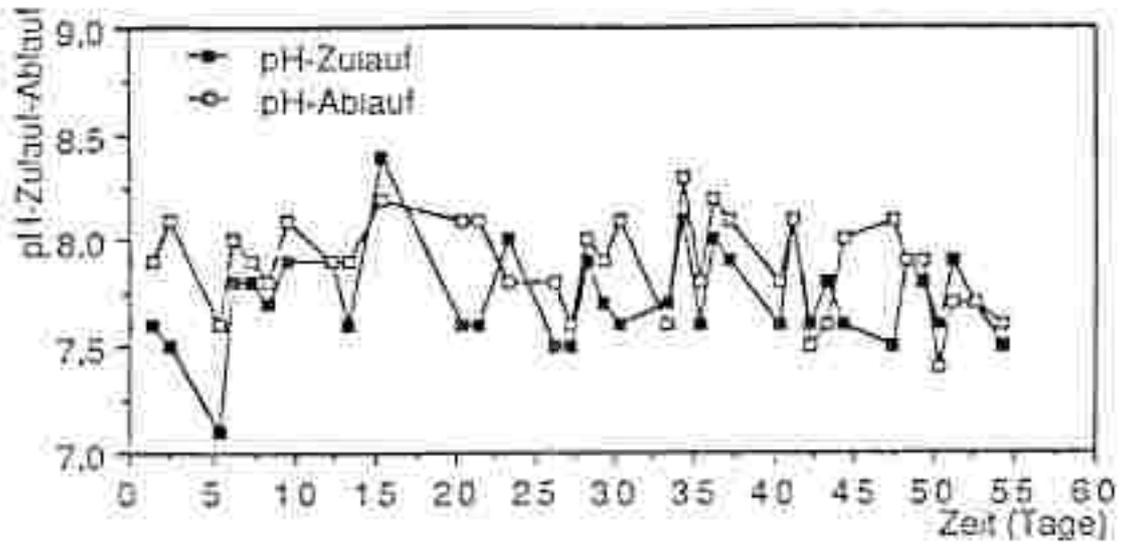


Abbildung 19: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor I: pH von Zu- und Ablauf von Tag 1 bis Tag 54.

Fließbettreaktor II: pH-Zulauf-Ablauf-Zeit

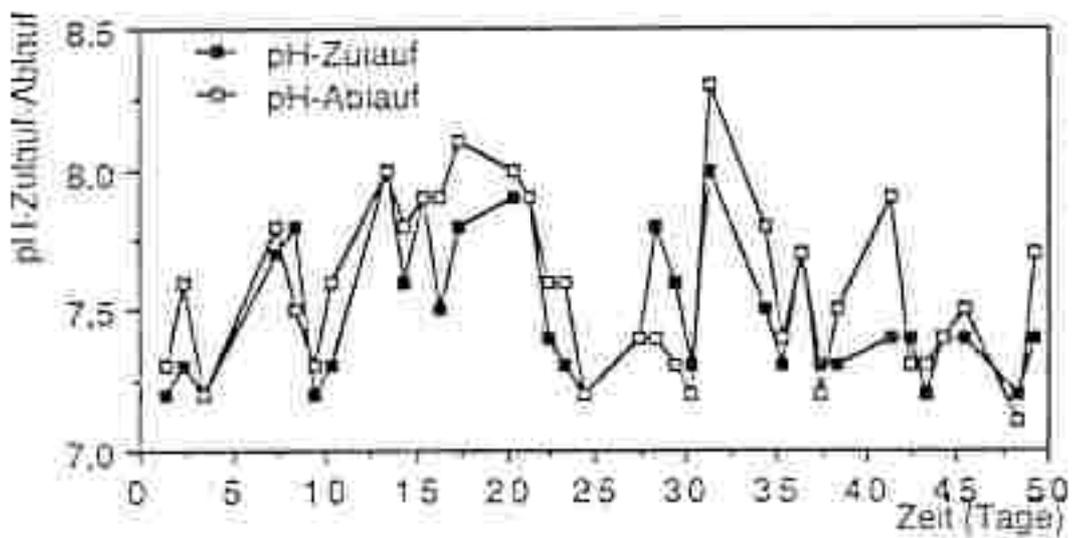


Abbildung 20: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor II: pH von Zu- und Ablauf von Tag 1 bis Tag 49.

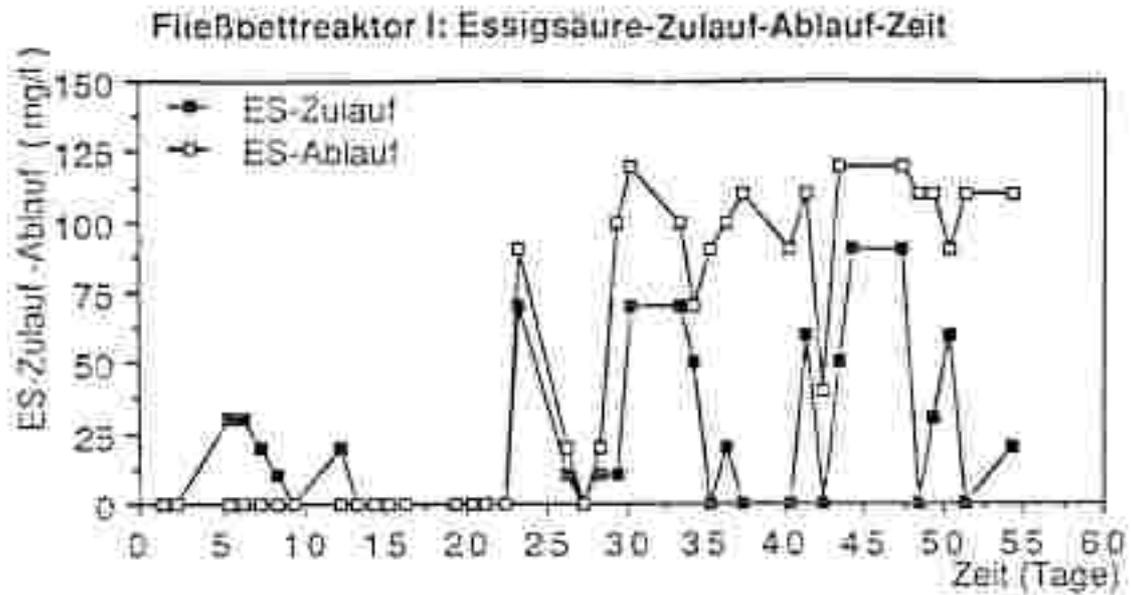


Abbildung 21: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor I: Essigsäure (mg/l) in Zu- und Ablauf von Tag 1 bis Tag 54.

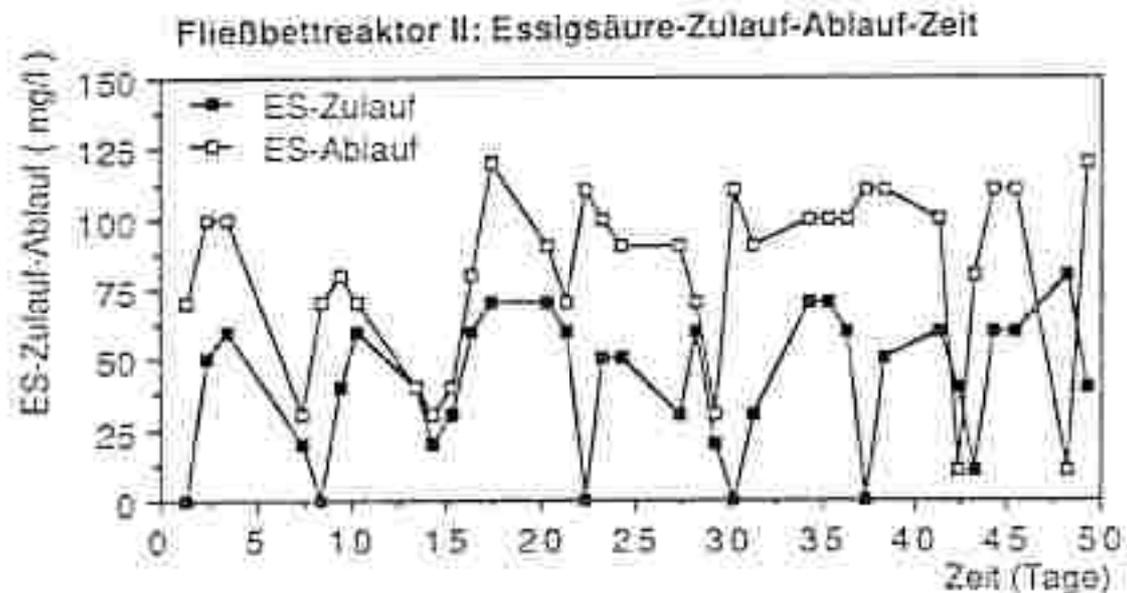


Abbildung 22: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor II: Essigsäure (mg/l) in Zu- und Ablauf von Tag 1 bis Tag 49.

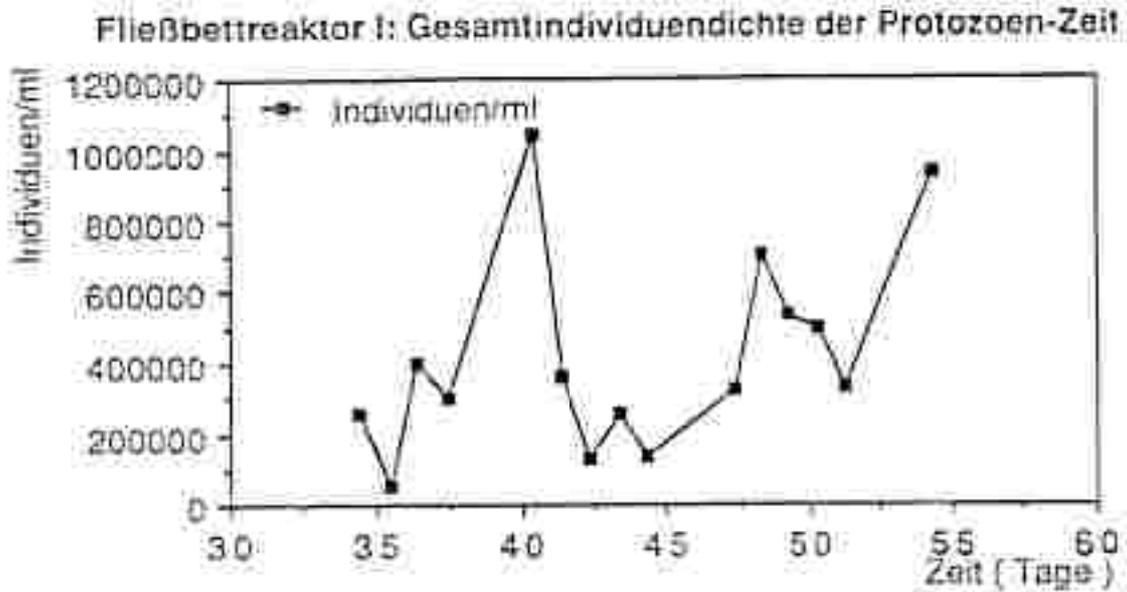


Abbildung 23: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor I: Gesamtindividuumdichte der Protozoen (Individuen/ml) von Tag 1 bis Tag 54.

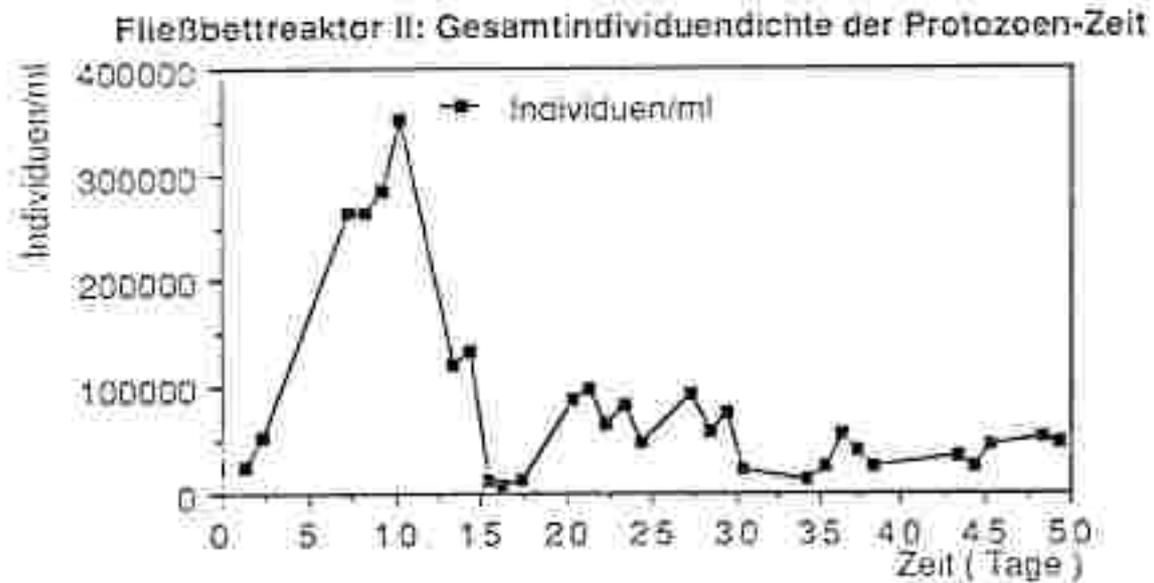


Abbildung 24: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor II: Gesamtindividuumdichte der Protozoen (Individuen/ml) von Tag 1 bis Tag 49.

Tabelle 1: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor I: Werte für einige Meßparameter.

Zeit (Tage)	CSB-Zulauf kg/m ³	CSB-Ablauf kg/m ³	CSB-Umsatz %	CSB-Elimination kg/m ³ ·d	Raumbelastung	Individuen pro m ³	Feed ml/min
1,32	0,286	0,259	9,44	0,11	1,18	-	10
2,33	0,293	0,240	18,09	0,22	1,20	-	10
5,29	0,263	0,253	3,80	0,04	1,08	-	10
6,29	0,250	-	-	-	1,03	-	10
7,28	0,240	-	-	-	0,99	-	10
8,28	0,190	0,154	19,95	0,15	0,78	-	10
9,41	0,170	0,142	16,47	0,11	0,70	-	10
10,00	-	-	-	-	-	-	10
12,29	0,165	0,116	29,70	0,20	0,68	-	-
13,29	0,164	0,155	5,49	0,04	0,67	-	10
14,40	0,056	0,014	75,00	0,17	0,23	-	10
15,29	0,083	0,066	20,48	0,07	0,34	-	10
16,29	0,037	0,019	48,65	0,07	0,15	-	10
19,29	0,030	0,016	46,67	0,06	0,12	-	10
20,33	0,476	0,348	26,89	0,53	1,96	-	10
21,33	0,362	0,340	6,08	0,09	1,49	-	10
22,46	0,360	0,345	4,17	0,06	1,48	-	10
23,31	0,362	0,297	17,95	0,27	1,49	-	10
26,29	0,210	0,200	4,76	0,04	0,86	-	10
27,29	0,152	0,111	26,97	0,17	0,62	-	10
28,29	0,537	0,421	21,60	0,48	2,21	-	10
29,34	0,354	0,187	47,17	0,69	1,46	-	10
30,32	0,296	0,189	36,15	0,44	1,22	-	10
33,29	0,169	0,122	27,81	0,19	0,69	-	10
34,28	-	-	-	-	-	255000	10
35,28	0,546	0,448	17,95	0,40	2,25	53750	10
36,29	0,548	0,441	19,52	0,44	2,25	401250	10
37,29	0,489	0,462	5,52	0,11	2,01	298750	10
40,29	0,435	0,425	2,30	0,04	1,79	1045000	10
41,29	0,440	0,396	10,00	0,18	1,81	360000	10
42,29	0,569	0,521	8,43	0,20	2,34	131250	30
43,33	0,561	0,524	6,59	0,15	2,31	257500	30
44,33	0,523	0,302	42,26	0,91	2,15	135000	30
47,33	0,521	0,453	13,05	0,28	2,14	326250	30
48,33	0,542	0,484	10,70	0,24	2,23	705000	30
49,30	0,482	0,466	3,32	0,06	1,98	533750	30
50,29	0,480	0,479	0,21	0,00	1,97	500000	30
51,29	0,490	0,481	1,84	0,04	2,01	328750	30
54,33	0,482	0,444	7,88	0,16	1,98	935000	30

Tabelle 2: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor II: Werte für einige Meßparameter.

Zeit (Tage)	CSB-Zulauf kg/m ³	CSB-Ablauf kg/m ³	CSB-Umsatz %	CSB-Elimination kg/m ³ ·d	Raumbelastung	Individuen pro ml	Feed ml/min
1,34	0,501	0,446	10,96	0,23	2,06	26250	10
2,34	0,498	0,468	6,02	0,12	2,05	52500	10
3,33	0,510	0,449	11,96	0,25	2,10	-	10
7,35	-	0,297	-	-	-	263750	10
8,33	0,495	0,378	23,64	0,48	2,04	263750	10
9,35	0,484	0,373	22,93	0,46	1,99	283750	10
10,29	0,472	0,361	23,52	0,46	1,94	351250	10
13,31	0,421	0,352	16,39	0,28	1,73	120000	10
14,31	0,201	0,162	19,40	0,16	0,82	132500	10
15,35	0,580	0,250	56,90	1,36	2,39	13750	10
16,29	0,521	0,492	5,57	0,12	2,14	7500	10
17,29	0,471	0,429	8,92	0,17	1,94	13750	10
20,29	0,461	0,420	8,89	0,17	1,90	87500	10
21,29	0,448	0,419	6,47	0,12	1,84	97500	10
22,28	0,546	0,444	18,68	0,42	2,25	66250	10
23,28	0,523	0,452	13,57	0,29	2,15	82500	10
24,29	0,430	0,382	11,16	0,20	1,77	47500	10
27,29	-	0,399	-	-	-	92500	10
28,29	0,397	0,199	49,87	0,81	1,63	58750	10
29,29	0,207	0,166	19,81	0,17	0,85	76250	10
30,29	0,571	0,488	14,53	0,34	2,35	22500	10
31,35	-	0,336	-	-	-	-	10
34,29	0,466	0,464	0,43	0,00	1,92	13750	10
35,27	0,440	0,413	6,14	0,11	1,81	26250	10
36,27	0,402	0,384	4,48	0,07	1,65	56250	10
37,35	0,515	0,459	10,87	0,23	2,12	40000	10
38,35	0,516	0,472	8,53	0,18	2,12	26250	10
41,29	0,431	0,430	0,23	0,00	1,77	-	10
42,34	0,380	0,163	57,10	0,89	1,56	-	30
43,29	0,526	0,476	9,50	0,20	2,16	35000	30
44,29	0,527	0,518	1,71	0,04	2,17	26250	30
45,37	0,484	0,389	19,63	0,39	1,99	45000	30
48,28	0,476	0,173	63,65	1,25	1,96	52500	30
49,29	0,537	0,491	8,57	0,19	2,21	48750	30

Tabelle 3: Anaerobe Vorrainigung von häuslichen Abwasser - Fließbettreaktor I: Werte für den Gehalt an flüchtigen Fettsäuren (mg/l) in Zu- und Ablauf.

Zeit	Essigsäure		Propionsäure		Iso-Buttersäure		Buttersäure	
	ES-Zulauf	ES-Ablauf	PS-Zulauf	PS-Ablauf	18S-Zulauf	18S-Ablauf	BS-Zulauf	BS-Ablauf
1,32	0	0	0	0	0	0	0	0
2,33	0	0	0	0	0	0	0	0
5,29	30	0	0	0	0	0	0	0
6,29	30	0	0	0	0	0	0	0
7,28	20	0	0	0	0	0	0	0
8,28	10	0	0	0	0	0	0	0
9,41	0	0	0	0	0	0	0	0
12,29	20	0	0	0	0	0	0	0
13,29	0	0	0	0	0	0	0	0
14,40	0	0	0	0	0	0	0	0
15,29	0	0	0	0	0	0	0	0
16,29	0	0	0	0	0	0	0	0
19,29	0	0	0	0	0	0	0	0
20,33	0	0	0	0	0	0	0	0
21,33	0	0	0	0	0	0	0	0
22,46	0	0	0	0	0	0	0	0
23,31	70	90	0	10	10	10	10	10
26,29	10	20	0	0	0	10	0	0
27,29	0	0	0	0	0	0	0	0
28,29	10	20	0	0	0	0	0	0
29,34	10	100	0	20	0	10	0	20
30,32	70	120	0	30	10	10	10	20
33,29	70	100	20	0	10	10	10	0
34,28	50	70	10	0	10	10	10	0
35,28	0	90	0	10	0	10	0	20
36,29	20	100	0	10	0	10	0	20
37,29	0	110	0	10	0	10	0	20
40,29	0	90	0	0	10	10	0	10
41,29	60	110	0	10	10	20	10	20
42,29	0	40	0	0	0	0	0	0
43,33	50	120	0	0	10	20	0	30
44,33	90	-	0	-	10	-	30	-
47,33	90	120	0	0	10	10	30	20
48,33	0	110	0	0	10	20	0	20
49,30	30	110	0	20	10	20	10	50
50,29	60	90	0	10	10	10	30	30
51,29	0	110	0	20	0	20	0	20
54,33	20	110	0	30	0	10	0	30

Tabelle 3: Anaerobe Vorreinigung von häuslichen Abwasser - Fließbettreaktor I: Werte für den Gehalt an flüchtigen Fettsäuren (mg/l) in Zu- und Ablauf.

Zeit (Tage)	Iso-Valeriansäure		Valeriansäure	
	IVS-Zulauf	VS-Ablauf	VS-Zulauf	VS-Ablauf
1,32	0	0	0	0
2,33	0	0	0	0
5,29	0	0	0	0
6,29	0	0	0	0
7,28	0	0	0	0
8,28	0	0	0	0
9,41	0	0	0	0
10,00	0	0	0	0
13,29	0	0	0	0
14,40	0	0	0	0
15,29	0	0	0	0
16,29	0	0	0	0
19,29	0	0	0	0
20,33	0	0	0	0
21,33	0	0	0	0
22,46	0	0	0	0
23,31	20	20	0	0
26,29	0	0	0	0
27,29	0	0	0	0
28,29	0	0	0	0
29,34	0	30	0	0
30,32	20	30	0	10
33,29	20	20	0	0
34,28	0	0	0	0
35,28	0	0	0	0
36,29	0	30	0	10
37,29	0	20	0	10
40,29	0	10	0	20
41,29	20	20	0	10
42,29	0	0	0	0
43,33	0	30	0	10
44,33	30	-	0	-
47,33	10	30	0	10
48,33	0	30	0	0
49,30	0	30	0	0
50,29	10	30	0	10
51,29	0	30	0	0
54,33	0	30	0	0

Tabelle 4: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor II: Werte für den Gehalt an flüchtigen Fettsäuren (mg/l) in Zu- und Ablauf.

Zeit (Tage)	Essigsäure		Propionsäure		iso-Buttersäure		Buttersäure	
	ES-Zulauf	ES-Ablauf	PS-Zulauf	PS-Ablauf	IBS-Zulauf	IBS-Ablauf	BS-Zulauf	BS-Ablauf
1,34	0	70	0	10	0	10	0	10
2,34	50	100	0	0	10	10	40	30
3,33	60	100	0	10	10	20	40	30
7,35	20	30	0	0	10	0	0	0
8,33	0	70	0	10	0	10	0	10
9,35	40	80	0	0	10	10	30	20
10,29	60	70	0	20	10	10	40	20
13,31	40	40	0	0	10	10	20	20
14,31	20	30	0	0	0	0	0	0
15,35	30	40	0	0	20	0	20	0
16,29	60	80	0	0	10	10	40	30
17,29	70	120	0	40	10	20	30	40
20,29	70	90	0	30	20	20	40	20
21,29	60	70	0	50	20	20	30	20
22,28	0	110	0	0	0	10	0	10
23,28	50	100	0	0	10	10	30	20
24,29	50	90	0	0	10	10	30	20
27,29	30	90	0	0	10	10	10	20
28,29	60	70	0	0	10	0	20	0
29,29	20	30	0	0	0	0	0	0
30,29	0	110	0	0	0	10	0	20
31,35	30	90	0	0	10	10	10	30
34,29	70	100	0	10	10	10	30	30
35,27	70	100	0	0	10	10	30	20
36,27	60	100	0	10	10	10	20	20
37,35	0	110	0	10	0	20	0	20
38,35	50	110	0	0	10	10	30	30
41,29	60	100	0	0	10	10	30	10
42,34	40	10	0	0	10	0	20	0
43,29	10	80	0	0	0	10	0	20
44,29	60	110	0	10	10	20	20	30
45,37	60	110	0	0	10	20	20	10
48,28	80	10	0	0	10	0	30	0
49,29	40	120	0	10	10	20	10	30

Tabelle 4: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor II: Werte für den Gehalt an flüchtigen Fettsäuren (mg/l) in Zu- und Ablauf.

Zeit (Tage)	Iso-Valeriansäure		Valeriansäure	
	IVS-Zulauf	VS-Ablauf	VS-Zulauf	VS-Ablauf
1,34	0	0	0	0
2,34	30	30	0	10
3,33	30	30	0	10
7,35	30	0	10	0
8,33	0	30	0	0
9,35	30	30	0	0
10,29	30	30	0	0
13,31	20	0	0	0
14,31	0	10	0	0
15,35	0	0	0	0
16,29	30	30	0	0
17,29	30	40	0	10
20,29	30	40	0	10
21,29	40	30	20	10
22,28	0	30	0	0
23,28	30	30	0	10
24,29	30	30	0	10
27,29	0	30	0	0
28,29	20	0	0	0
29,29	0	0	0	0
30,29	0	0	0	0
31,35	0	20	0	0
34,29	20	20	10	0
35,27	20	20	0	10
36,27	20	0	0	0
37,35	0	30	0	10
38,35	20	30	0	10
41,29	20	20	10	0
42,34	10	0	0	0
43,29	0	20	0	0
44,29	20	30	0	10
45,37	20	20	0	0
48,28	30	0	10	0
49,29	20	30	0	10

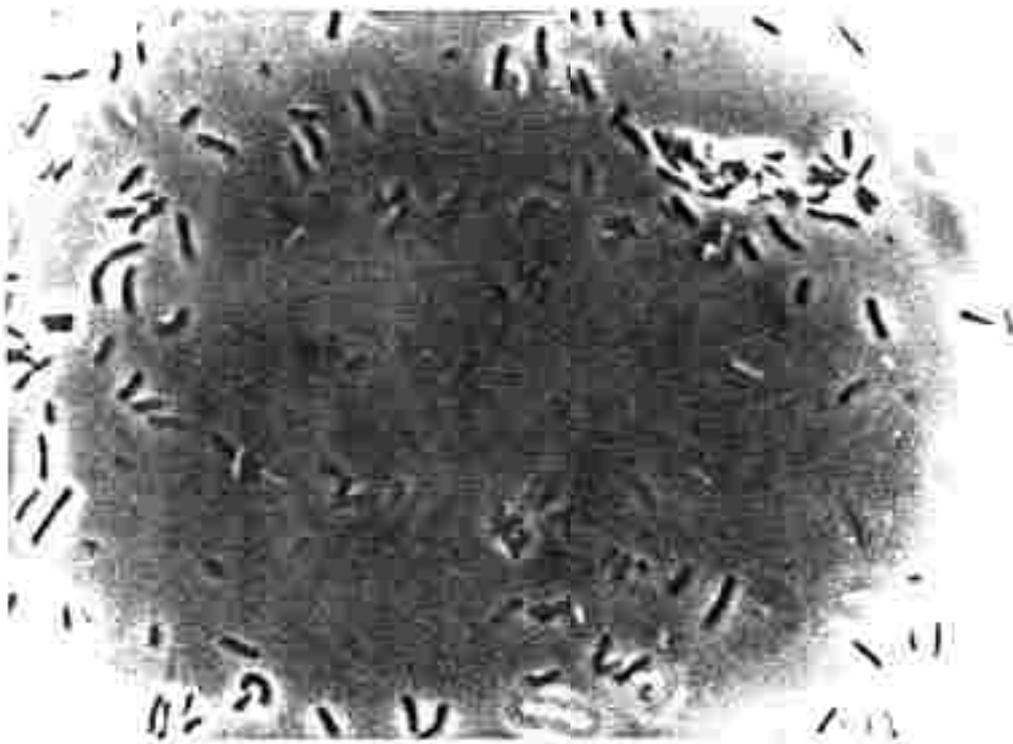


Foto 1: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor
1: freischwimmende Stäbchenbakterien von Tag 33, Vorfixierung mit
Formaldehyddämpfen, 1000-fache Vergrößerung.

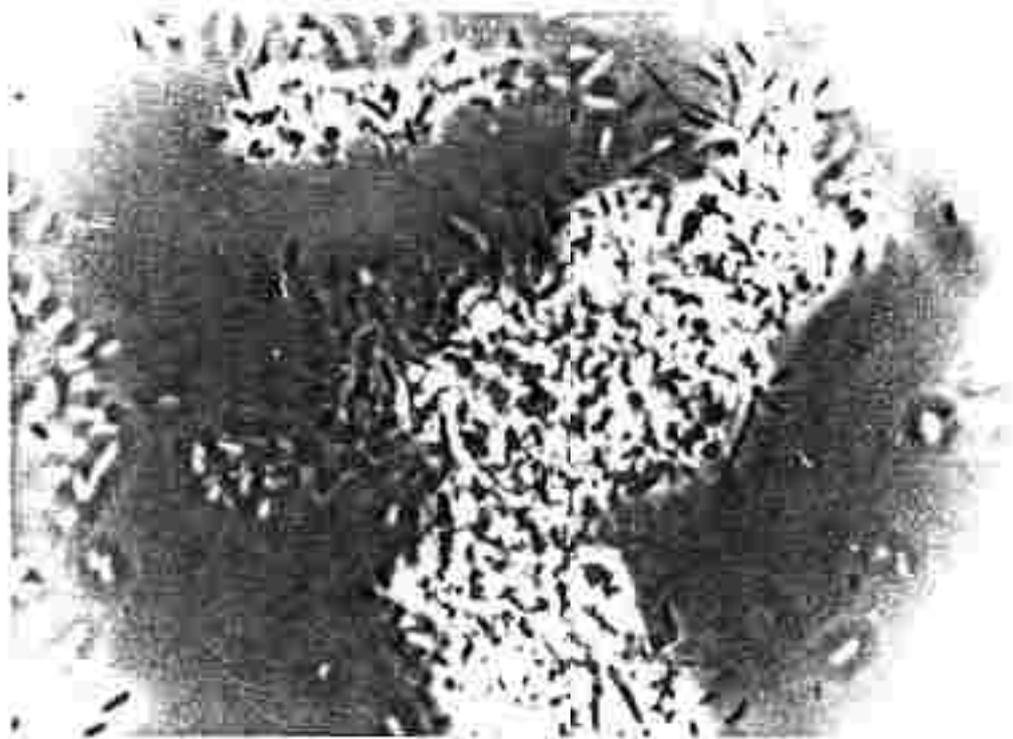


Foto 2: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor
1: Bakterienflocke aus Matrix und Stäbchenbakterien von Tag 33,
Vorfixierung mit Formaldehyddämpfen, 1000-fache Vergrößerung.

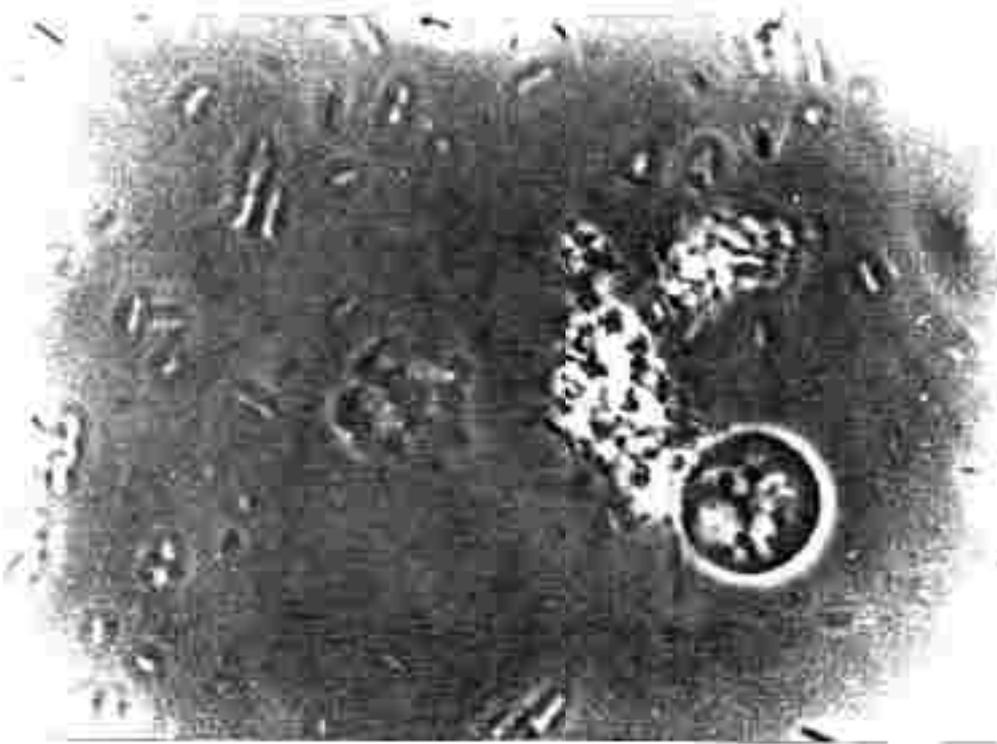


Foto 3: Anaerobe Vorreinigung von häuslichem Abwasser - Fließbettreaktor I: *Histomonas meleagridis* in Randbereich einer Bakterienflocke von Tag 33, Vorfixierung mit Formaldehyddämpfen, 1000-fache Vergrößerung.