

Bestimmung der Abbaubarkeit und Substratumsatzraten von Rinderpanseninhalt unter anaeroben Bedingungen

Von Wolfgang P. Tritt, Braunschweig-Völkenrode, und Ho Kang, Chungnam*)

DK 628.35

Zur Planung und Betriebsoptimierung eines anaeroben Verfahrens zur Biogasgewinnung aus Rinderpanseninhalt sind Kenntnisse über das Abbauverhalten des eingesetzten Substrates notwendig. Gegenwärtig sind nur wenige Angaben zur biologischen Umsetzung von Panseninhalt verfügbar, die sich zudem lediglich auf die erreichbaren Methan- ausbeuten beziehen.

Zur Bestimmung der Abbaubarkeit und zur Abschätzung der Substratumsatzgeschwindigkeit wurden Batch-Versuche durchgeführt. Aus den beobachteten Meßergebnissen konnten mit Hilfe von einfachen, in diesem Aufsatz beschriebenen Ansätzen die gewünschten Aussagen abgeleitet werden.

1. Einleitung

Im Jahre 1989 wurden weltweit ca. 20 Mio. Rinder geschlachtet. Ausgehend von ca. 60 kg Panseninhalt pro Tier, ergibt sich eine Gesamtmenge von 1,2 Mio. t zu entsorgender Reststoffe aus der Rinderschlachtung. Diese organischen Reststoffe stellen einerseits für die Schlachthöfe ein z.T. erhebliches Entsorgungsproblem, andererseits aber auch ein Energiepotential dar. Die Energie kann durch ein anaerobes Verfahren zur Biogasgewinnung nutzbar gemacht werden. Zur Planung und Betriebsoptimierung einer solchen Anlage sind jedoch Kenntnisse über das anaerobe Abbauverhalten notwendig.

Bedingt durch die stofflich sehr komplexe Zusammensetzung des Substrates, ist eine Vorhersage von substratspezifischen Kenngrößen ohne eine experimentelle Bestimmung nicht möglich. Angaben über die substratspezifische Methan- ausbeute und Hinweise zum Anfahren von Anaerobreaktoren können relativ einfach direkt aus den mit Batch-Reaktoren gewonnenen Meßergebnissen abgeleitet werden [1]. Zur exakten Bestimmung kinetischer Parameter enzymatisch katalysierter Reaktionen bei gleichzeitiger Veränderung der Biomassekonzentration sind aber prinzipiell kontinuierlich betriebene Durchlaufreaktoren besonders geeignet. Allerdings verlangen diese einen sehr hohen apparativen Laboraufwand und größere Mengen an Substrat, was sich häufig als nachteilig erweisen kann.

Wird ein Batch-Reaktor für kinetische Studien eingesetzt, so muß dem mit dem Substratabbau einhergehenden Biomassezuwachs Rechnung getragen werden. Die beschreibende Differentialgleichung kann für einen Batch-Reaktor unter Vernachlässigung des Erhaltungsstoffwechsels geschlossen gelöst werden [2]. Allerdings ist dann neben der Bestimmung der Ausgangskonzentration an Biomasse bzw. an Substrat die Ermittlung der Sättigungskonstanten, der spezifischen maximalen Bakterienwachstumsrate und des spezifischen Biomassezuwachses z.B. unter Anpassung experimenteller Wertepaare an ein nichtlineares Regressionsmodell nach der Methode der kleinsten Summe der Fehlerquadrate erforderlich.

*) *Dipl.-Ing., Dipl.-Ing. (FH) W.P. Tritt ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technologie (Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Baader) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode. Ho Kang, Ph.D. ist Assistant Professor am Lehrstuhl für Umweltingenieuren an der Universität Chungnam (Korea).*

Im nachfolgenden wird ein im Vergleich hierzu vereinfachter Modell-Ansatz zur Abschätzung der Substratumsatzraten aus Batch-Versuchen verwendet. Um Aussagen über die maximale Abbaubarkeit bzw. die nicht abbaubare Fraktion machen zu können, sind theoretisch unendlich lange Untersuchungszeiträume notwendig; ein einfacher mathematischer Ansatz läßt jedoch nach einer verhältnismäßig kurzen Versuchszeit die hinreichend exakte Bestimmung der maximalen Abbaubarkeit von Panseninhalt zu.

2. Durchführung der Versuche

In Abhängigkeit von der vorliegenden Substratbeschaffenheit bzw. -zusammensetzung muß vor Beginn der Versuche die Basisgröße festgelegt werden, auf die die gemessenen und berechneten Werte bezogen werden. Als Parameter bieten sich u.a. der Trockensubstanzgehalt, der organische Trockensubstanzgehalt und der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) an.

Für feststoffreiche Substrate wird man in der Regel, schon allein um eine gewisse Vergleichbarkeit der eigenen Ergebnisse mit den Angaben aus dem Schrifttum zu haben, als Basis die Trockensubstanz oder die organ. Trockensubstanz festlegen. Es ist aber die Tatsache zu berücksichtigen, daß sich bei der Trockensubstanzanalyse die organischen Säuren zum größten Teil verflüchtigen. Die Essigsäure als größte Fraktion im Säurespektrum verflüchtigt sich vollständig und die Propionsäure als zweitgrößte Komponente zu einem unbestimmbar großen Teil. Sofern also ein Substrat mit einer relativ hohen Konzentration an organischen Säuren vorliegt, oder aber eine Bestimmung der organischen Säuren nicht möglich ist, sollte auf eine andere Bezugsbasis ausgewichen werden.

Da bei der Bestimmung des CSB auch evtl. vorliegende organische Säuren mit erfaßt werden, kann der CSB hier eine geeignete Bezugsbasis darstellen. Kann das Vorliegen von organischen Säuren a priori ausgeschlossen werden, so ist der Analysenaufwand bei einer alleinigen Bestimmung der Trockensubstanz bzw. der organ. Trockensubstanz vergleichsweise geringer als bei der CSB-Bestimmung. Für die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen wurde die organ. Trockensubstanz als Bezugsgröße gewählt.

Die Versuche sollten so lange durchgeführt werden, bis die auf das Fermentervolumen bezogene tägliche Gasproduktivität der Batch-Fermenter unter 0,1 l/l d liegt. Je nach Art des eingesetzten Substrats könnten sich unter Beachtung der genannten Forderung Versuchszeiträume von mehr als 90 Tagen ergeben.

2.1 Substrat und Inokulum

Die untersuchten Panseninhalte stammten von mit Mais- und Grassilage gefütterten Rindern. Die Rindermägen wurden direkt in ein Auffanggefäß entleert, um sicherzustellen, daß das Substrat im Originalzustand, ohne eine etwaige Verdünnung mit Spülwasser, vorlag.

Der relativ niedrige pH-Wert des Panseninhalts von 5,8 läßt sich auf eine dreitägige Lagerung (5 °C) des Substrates vor dem Ansetzen der Versuche zurückführen. Der pH-Wert im frischen Panseninhalt liegt bei 7 bis 8. Als Inokulum für die Versuche wurde der teilweise abgebaute Ablauf einer mit Rinderflüssigmist betriebenen Anaerob-Versuchsanlage verwendet. In **Tafel 1** sind die Werte der prozeßrelevanten Kenngrößen von Rinderpanseninhalt und Inokulum zu Versuchsbeginn dargestellt.

	pH-Wert	Trockenmasse %	org. Trockenmasse %	flücht. Fettsäuren (C ₂ -C ₆) mg/l
Panseninhalt	5,8	11,3	9,9	16880
Inokulum	7,9	4,6	2,8	17945

Tafel 1. Prozeßrelevante Kenngrößen von Panseninhalt und Inokulum zu Prozeßbeginn.

2.2 Methoden und Versuchsaufbau

Die Versuche wurden als Batchversuche in 5 l-Gärbehältern (Füllvolumen 3,5 l) bei einer konstanten Temperatur von 37 °C durchgeführt. Die einzelnen Gärbehälter wurden mit unterschiedlichen Mengenverhältnissen an organischer Trockensubstanz von Substrat und Inokulum, im weiteren Belastungsverhältnis (BV) genannt, befüllt. Eine Übersicht über die untersuchten Belastungsverhältnisse und die sich daraus ergebenden Massen organischer Trockensubstanz von Substrat und Inokulum gibt **Tafel 2**.

BV	Einwaage an organischer Trockensubstanz		pH-Wert		Konzentration flücht. Fettsäuren		Methanausbeute aus Substrat *)
	g		-		mg/l		
	Panseninhalt	Inokulum	Beginn	Ende	Beginn	Ende	
0,2	18,2	91,2	7,8	7,6	17890	520	442
0,4	34,6	86,6	7,7	7,6	17840	410	306
1,0	75,3	75,3	7,5	7,5	17710	390	323
2,5	141,9	56,8	7,2	7,6	17510	460	298
5,0	201,4	40,3	6,9	7,5	17330	410	194
7,5	234,0	31,2	6,7	7,5	17230	1160	276
10,0	254,6	25,5	6,6	7,7	17160	970	138

*) Normzustand und bezogen auf zugeführte organische Trockensubstanz einschließlich der flüchtigen Fettsäuren

Tafel 2. Kenngrößen und Methanausbeuten für die Batch-Versuche bei verschiedenen Belastungsverhältnissen (BV); Füllvolumen 3,5 l.

Sowohl das Substrat als auch das Inokulum wurden vor dem Ansetzen der Versuche durch intensives Rühren homogenisiert. Zur Bestimmung der Gasausbeute aus dem Inokulum wurden drei Blindversuche mit ausschließlich Inokulum angesetzt. Die Methanausbeute für das jeweilige Substrat wurde dadurch ermittelt, daß von der Gesamtmethanausbeute der jeweiligen Mischung der entsprechende Blindwert (Mittelwert aus den 3 Ergebnissen) für das Inokulum abgezogen wurde.

Um den Inhalt zu mischen, wurden die Gärbehälter täglich von Hand geschüttelt. Das entstandene Gas wurde in aluminiumbedampften Kunststoffbeuteln gesammelt und analysiert, sofern eine ausreichende Gasmenge (ca. 2 l) vorhanden war. Vor der Bestimmung des Methangehaltes mit einem IR-Methananalysegerät wurde das Biogas zum Entzug von Feuchtigkeit über ein Silikagel-Filter geleitet. Das Gasvolumen wurde mit Naßgaszählern gemessen. Die ermittelten Gasmengen wurden auf Normzustand (0 °C, 1,013 bar) umgerechnet und auf die Masse der eingesetzten organischen Trockensubstanz des Panseninhaltes bezogen.

Der Trockensubstanzgehalt wurde durch Trocknen (bei 105 °C) bis zur Gewichtskonstanz, der organische Trockensubstanzgehalt wurde durch Veraschen der getrockneten Proben bei 550 °C bestimmt. Die pH-Werte wurden mit einer Glaselektrode gemessen. Die Konzentration der flüchtigen Fettsäuren (C₂-C₆) wurde gaschromatographisch bestimmt, und der sich bei der Trockensubstanzanalyse verflüchtigende Anteil ist zu den gemessenen Trockensubstanzgehalten addiert worden.

3. Berechnungsgang

Die maximale Abbaubarkeit des Substrates kann auf der Basis der während der Batch-Versuche gemessenen täglichen Methanproduktion durch eine graphisch-statistische Datenanalyse bestimmt werden.

Diese Methode basiert auf einer linearen Regression des substratbezogenen Wertes der gewählten Basis (Trockensubstanz - TS; organische Trockensubstanz - oTS; chemischer Sauerstoffbedarf - CSB) im Gärbehälter zur Zeit t und des ursprünglichen Wertes (TS₀; oTS₀; CSB₀) zu Beginn der Versuche.

Während die Konzentration des als Basis herangezogenen Parameters (TS₀; oTS₀; CSB₀) durch Analysen direkt bestimmt wird, wird der aktuelle Wert (TS; oTS; CSB) im Gärbehälter aus der bis zum Zeitpunkt t gebildeten Gasmenge errechnet. Dieser Berechnung liegen folgende Annahmen zugrunde:

- die Masse des umgesetzten, organischen Materials entspricht der Masse des hieraus gebildeten Biogases;
- das Biogas setzt sich nur aus den Komponenten CH₄ und CO₂ zusammen;
- das Biogas verhält sich wie ein ideales Gas.

Das am Ende der Versuchszeit vorliegende Verhältnis TS_e/TS₀ (bzw. oTS_e/oTS₀; CSB_e/CSB₀) gibt Aufschluß über den Anteil der unter den vorliegenden Bedingungen (Batch-Versuch) nicht abbaubaren (TS_e/TS₀) bzw. abbaubaren Substanz [1 - (TS_e/TS₀)]. Die nicht abbaubare Substanz setzt sich zusammen aus den "bakteriellen Nebenprodukten" (Bakterien, Bakterienteile bzw. -bestandteile, Metaboliten etc.) und der "tatsächlich" nicht weiter abbaubaren Fraktion.

Wird der Kurvenzug, der sich aus der Auftragung des Verhältnisses TS/TS₀ (bzw. oTS/oTS₀; CSB/CSB₀) über der reziproken Versuchszeit ergibt, graphisch bis zum Abszissenwert 1/∞ verlängert, so gibt der Ordinatenabschnitt den Anteil der nicht mehr abbaubaren Substanz (R_∞) an, **Bild 1**.

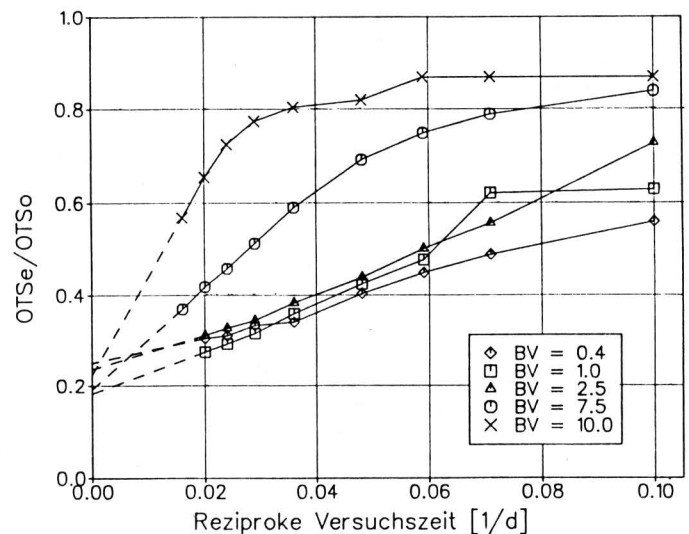


Bild 1. Anteil nicht umgesetzten Substrates als Funktion der reziproken Versuchszeit für verschiedene Belastungsverhältnisse; der Ordinatenabschnitt gibt den Anteil der nicht mehr abbaubaren Substanz (R_∞) an; Batch-Versuche mit Rinderpanseninhalt.

Die maximale Abbaubarkeit (MA) in % ergibt sich damit zu:

$$MA = (1 - R_{\infty}) \cdot 100 \quad (1)$$

Die berechneten jeweiligen TS- und oTS-Gehalte bzw. CSB-Konzentrationen im Gärbehälter werden um die ermittelte, nicht mehr abbaubare Fraktion (R_{∞}) bereinigt und die so berechneten Werte in einem anschließenden Rechengang unter Zugrundelegung eines kinetischen Modellansatzes 1. Ordnung zur Abschätzung der Substratumsatzrate bzw. -geschwindigkeit herangezogen.

Als einfachster Ansatz hierfür wird gewählt

$$-dS/dt = k S \quad (2),$$

worin S die Masse des abbaubaren Substrats und k die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante mit der Dimension Zeit^{-1} darstellt.

Für $t = 0$; $S = S_0$ und $t = t_e$; $S = S_e$ folgt für Gl. (2) die Lösung

$$\ln(S_0/S_e) = k t \quad (3).$$

Gl. (3) ist die Gleichung einer Geraden, deren Steigung die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k ist.

4. Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

4.1 Maximale Abbaubarkeit

Der Anteil der während der Versuchsdauer bereits abgebauten organischen Trockensubstanz – berechnet aus der Methanproduktion – und der Anteil der maximal abbaubaren oTS, der sich aus der graphischen Extrapolation der Abbaukurven als Schnittpunkt mit der Ordinate ergibt (Bild 1), sind in **Tafel 3** dargestellt.

BV	Vers. zeit	Anteil abgebauter oTS bei Vers.-ende	max. Abbaubarkeit MA	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k		quasi stetige Bedingungen	
				quasi stetige Bedingungen	Maximalwert	Dauer	von ... bis
-	d	%	%	d^{-1}	d^{-1}	d	d
0,2	49	99	(100)	0,088	0,220	23	5.-28.
0,4	49	70	78	0,064	0,154	22	6.-28.
1,0	49	73	83	0,051	0,129	32	17.-49.
2,5	49	69	79	0,048	0,101	35	14.-49.
5,0	49	44	(50)	0,044	0,100	28	21.-49.
7,5	63	63	80	0,025	0,076	53	10.-63.
10,0	63	43	75	0,016	0,023	28	35.-63.

Tafel 3. Maximale Abbaubarkeit und Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten bei Batch-Versuchen mit verschiedenen Belastungsverhältnissen (BV).

Bei der überwiegenden Anzahl der Ergebnisse (BV = 10,0; 7,5; 2,5; 1,0; 0,4) liegt die maximale Abbaubarkeit der oTS der untersuchten Rinderpenseninhalte bei 75–83 %. Oder anders ausgedrückt: ein Restanteil (R_{∞}) der oTS von 17–25 % ist anaerob nicht weiter abbaubar.

Entgegen den hier ermittelten verschieden großen Anteilen an abgebauter oTS am Versuchsende, die sich aus den unterschiedlichen Abbaugeschwindigkeiten – bedingt durch die variierenden Belastungsverhältnisse – ergeben, ist für die maximale Abbaubarkeit theoretisch ein konstanter Wert zu erwarten.

Daß für die max. Abbaubarkeit des untersuchten Substrates hier eine gewisse Bandbreite vorliegt, kann dadurch erklärt werden, daß es sich bei Penseninhalten um ein relativ inhomogenes halmiges Material, mit einer Halmgröße von bis zu 4 cm, handelt. Die Ausgangssubstrate sind nicht mit einem Schneidrührgerät (Ultra-Turrax), sondern lediglich

durch Rühren homogenisiert worden. Auf eine Vorab-Zerkleinerung wurde im Hinblick auf gewünschte Praxisnähe der Versuchsergebnisse verzichtet; eine Zerkleinerung der Pflanzenfasern hätte den Bakterien bessere Abbaumöglichkeiten geboten und somit einen verzerrenden Einfluß auf die Ermittlung der Abbaugeschwindigkeiten gehabt.

Die abweichenden Ergebnisse, die bei den Belastungsverhältnissen 0,2 und 5,0 erzielt wurden, können durch den zuvor genannten Grund erklärt werden. Während bei BV = 0,2 zufällig der gesamte zugegebene Rinderpenseninhalte in gut abbaubarer Form vorlag (99 % oTS-Abbau innerhalb der Versuchszeit von 49 Tagen), muß bei BV = 5,0 ein unverhältnismäßig großer Anteil an nicht abbaubarer Substanz vorgelegen haben. Eine Hemmung des biologischen Prozesses kann ausgeschlossen werden, da der hohe Anteil an flüchtigen Fettsäuren zu Beginn des Versuches auf eine vergleichsweise niedrige Konzentration abgebaut wurde (Tafel 2). Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Abbaukurven für BV = 0,2 und BV = 5,0 in Bild 1 nicht dargestellt worden.

Es wird vermutet, daß es sich bei der anaerob nicht weiter abbaubaren Fraktion (R_{∞}) von 17–25 % der oTS, die bei den meisten Belastungsverhältnissen festgestellt worden ist, um einen Substratrest mit einem hohen Anteil an Lignin bzw. lignozellulosehaltigem Material handelt. Während die meisten Biopolymere relativ leicht und schnell abgebaut werden können, werden Lignozellulose enthaltende Materialien nur langsam und unvollständig abgebaut, da das Lignin anaerob nicht gespalten werden kann und damit sehr hemmend auf die enzymatische Hydrolyse der Polysaccharide Zellulose und Hemizellulose wirkt [3].

Unter Einbeziehung der Erkenntnisse, die sich aus der Ermittlung der maximalen Abbaubarkeit und der diskutierten Problematik des Homogenisierens der Substrate ergeben, kann als Mittelwert für die Methanausbeute (Normzustand) aus dem untersuchten Rinderpenseninhalte 300 l $\text{CH}_4/\text{kg oTS}_{\text{zu}}$ angegeben werden. (Tafel 2).

4.2 Substratumsatzraten

Unter der vereinfachenden Annahme einer Reaktion 1. Ordnung konnten die Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten (k) bei den verschiedenen Belastungsverhältnissen ermittelt werden. Diese k-Werte stellen die Veränderung (Abbau) des oTS-Gehaltes innerhalb einer bestimmten Zeit dar.

Generell kann gesagt werden, daß in dem Maße, wie das Belastungsverhältnis (Substrat/Inokulum) größer wurde, die Substratumsatzgeschwindigkeiten in den Gärbehältern abnahmen. Werden aufgrund der unter 4.1 beschriebenen Einflüsse die k-Werte für BV = 0,2 ausgeklammert, dann würden, wie aus Tafel 3 hervorgeht, die höchsten Substratumsatzraten bei einem Belastungsverhältnis BV = 0,4 festgestellt. Für die mittlere Abbaugeschwindigkeit unter quasi stetigen Bedingungen kann der Wert $k = 0,064 d^{-1}$ und für die maximale überhaupt aufgetretene Abbaugeschwindigkeit der Wert $k = 0,154 d^{-1}$ genannt werden.

Erwartungsgemäß lagen bei BV $\geq 10,0$ die Substratumsatzraten mit $k = 0,016 d^{-1}$ für die mittlere Geschwindigkeit unter quasi stetigen Bedingungen und mit $k = 0,023 d^{-1}$ als Maximalwert niedriger als die Ergebnisse der anderen Gärbehälter.

Die Tatsache, daß die Substratumsatzraten für den größten Teil der Belastungsverhältnisse (BV = 0,4–5,0) für einen längeren Versuchszeitraum von 22–35 d in einer engen Bandbreite von $k = 0,044–0,064 d^{-1}$ lagen (Tafel 3), läßt auf eine substrat- bzw. transportabhängige Limitierung des Abbauprozesses schließen. Das heißt, während dieser unter "quasi stetigen Bedingungen" ablaufenden Phase geht der Einfluß aus Änderungen der aktiven Biomasse gegen Null.

Die o.g. mittleren Substratumsatzraten entsprechen einer Verweilzeit von 16–23 d. An dieser Stelle ist anzumerken, daß die hydraulische Verweilzeit in laufenden Versuchen mit einer halotechnischen Versuchsanlage ($V = 25 \text{ m}^3$) zur Methanisierung von Penseninhalte eben in dieser Spanne liegt.

Die niedrigeren Substratumsatzgeschwindigkeiten, die für $BV = 7,5$ und $BV = 10,0$ festgestellt wurden, sind auf die geringere Bakterien-dichte, hauptsächlich induziert durch das Inokulum, zu Anfang der Ver-suche zurückzuführen. Das stärkere Ansteigen der k -Werte im letzten Drittel der Versuchszeit, Bild 2, sowie die ermittelten Summenkurven der Methanerträge [1], die als Abbau der organischen Substanz auch Bild 1 zu entnehmen sind, zeigen deutlich, daß hier während einer lan-gen Zeit die Konzentration der aktiven Biomasse der abbaulimitierende Faktor war. Der unterschiedliche Verlauf der Kurven $k \cdot t = f(t)$ wird be-sonders anschaulich aus dem Vergleich von Bild 2 mit Bild 3, in dem das Produkt $k \cdot t$ für $BV = 0,4$ dargestellt ist.

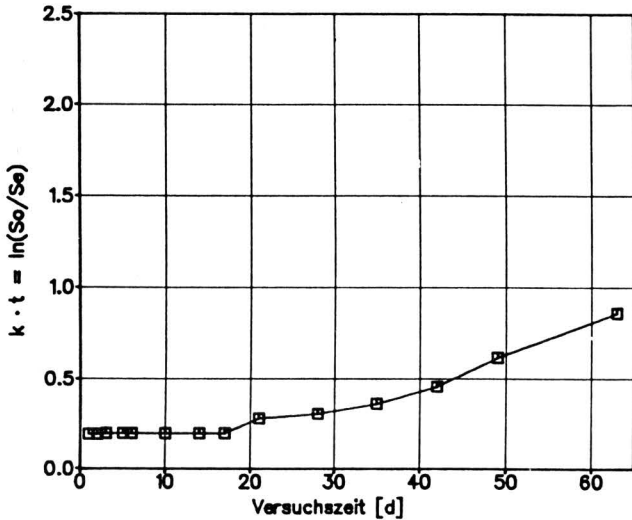


Bild 2. Produkt Reaktionsgeschwindigkeitskonstante mal Zeit in Ab-hängigkeit von der Versuchszeit bei der Methanisierung von Rinderpan-seninhalt mit einem Belastungsverhältnis $BV = 10,0$.

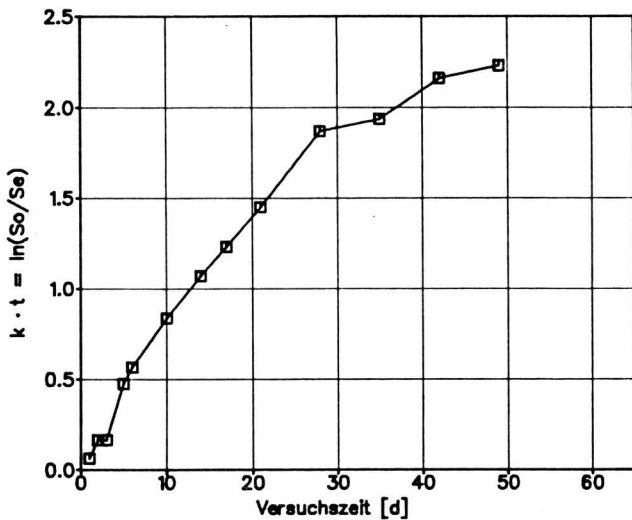


Bild 3. Produkt Reaktionsgeschwindigkeitskonstante mal Zeit in Ab-hängigkeit von der Versuchszeit bei der Methanisierung von Rinderpan-seninhalt mit einem Belastungsverhältnis $BV = 0,4$.

Es kann festgestellt werden, daß die für Panseninhalt ermittelten Sub-stratumsatzraten höher sind, d.h. daß das Substrat sich schneller biolo-gisch umsetzen läßt als frisches Pflanzenmaterial wie z.B. Hirse oder Elefantengras [4]. Dies kann dadurch erklärt werden, daß das unter-suchte Pflanzenmaterial des Panseninhaltes bereits im Rindermagen "anaerob vorbehandelt" worden ist; der hohe Anteil an flüchtigen Fett-säuren (Tafel 1) ist ein Indiz hierfür.

5. Zusammenfassung

Die Auswertung der durchgeführten Batch-Versuche zum Abbauver-halten von Rinderpanseninhalt unter anaeroben, mesophilen Bedin-gungen führte im Hinblick auf die maximale Abbaubarkeit des Substra-tes und der zu erreichenden Substratumsatzraten zu folgende., für die Beurteilung bzw. Optimierung von großtechnischen Anaerob-Reaktoren wichtigen Erkenntnissen. Abhängig vom Ligningehalt der Futter-pflanzen existiert eine nicht weiter abbaubare Fraktion im Pansenin-halt. Für die untersuchten Panseninhalte wurde, bezogen auf die eingesetzte organische Trockensubstanz, ein nicht abbaubarer Anteil von 17-25 % ermittelt.

Die Geschwindigkeit der Substratumsetzung bei den verschiedenen An-impfverhältnissen Substrat/Inokulum ist, sofern ein Verhältnis kleiner als 5,0 gewählt wurde, innerhalb der ersten 5-6 d zunächst relativ hoch und dann für einen Zeitraum von 22-35 d nahezu konstant bei k -Werten von $0,044-0,064 \text{ d}^{-1}$.

Eine Überprüfung dieser aus den beobachteten Versuchsergebnissen abgeleiteten bzw. errechneten Werte mit einem größeren völdurch-mischten Ausschwemmreaktor ($V = 25 \text{ m}^3$) hat gezeigt, daß der zur Be-stimmung der Substratumsatzraten gewählte Ansatz ein geeignetes Ins-trument für den Anlagenplaner zur näherungsweise Abschätzung der zu erwartenden Substratumsatzraten darstellt.

Als für die Praxis relevante, mittlere Methanausbeute aus Rinderpan-seninhalt (Normzustand und bezogen auf die zugeführte organische Trockensubstanz) kann ein Wert von ca. 300 l/kg angegeben werden.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] Tritt, W.P.: Untersuchungen zum anaeroben Abbauverhalten von Pansen- und Schweinemageninhalten. Müll und Abfall Bd. (1989) Nr. 11, S. 577/83.
- [2] ● Braha, A.: Bioverfahren in der Abwassertechnik. Erstellung reaktionstechnischer Modelle mittels Labor-Bioreaktoren und Scaling-up in der biologischen Abwasserreinigung. Wiesbaden, Berlin: Udo Pfriemer 1988.
- [3] Sahn, H.: Biologie der Methan-Bildung. Chem.-Ing.-Techn. Bd. 53 (1981) Nr. 11, S. 854/63.
- [4] Jewell, W.J., H. Kang, B.K. Richard u. F. Herndon: Engineering design considerations for methane fermentation of energy crops. Annual Report to Gas Research Institute, Chicago, USA, 1988.