

Verwendete Formelzeichen

| | | |
|----------|------------------------|--|
| c | m/s | Fahrgeschwindigkeit |
| d | μm | Teilchengröße |
| n | U/min | Trommeldrehzahl |
| s | m | Schnittbreite |
| t | s | Zeit |
| v | m/s | Strömungsgeschwindigkeit |
| v_{rw} | m/s | Geschwindigkeit der Windströmung bezogen auf das Fahrzeug = relative Windgeschwindigkeit |
| v_w | m/s | Windgeschwindigkeit |
| w | m/s | Teilchengeschwindigkeit |
| A_F | % | prozentualer Anteil des Feinstaubes |
| A_G | % | prozentualer Anteil des Grobstaubes |
| D | % | Durchgang (Durchgangssumme) |
| E | kg/h | Staubemissionsstrom |
| E_S | kg/h | Emissionsstrom am Stroh- und Spreuaustritt |
| E_M | kg/h | Emissionsstrom am Mähtisch |
| F | m^2 | Fläche |
| T | $^{\circ}\text{C}$ | Temperatur |
| U_K | % | Feuchtegehalt des Kornes |
| Q | m^3/h | abgesaugte Luftmenge |
| α | $^{\circ}$ | Windeinfallswinkel, gemessen im Uhrzeigersinn (0° bis 360°) |
| ζ | mg/m^3 | Staubgehalt, auf Normzustand des Gases (0°C , 1,013 bar) bezogen |

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] Batel, W.: Messungen zur Staub-, Lärm- und Geruchsbelastung an Arbeitsplätzen in der landwirtschaftlichen Produktion und Wege zur Entlastung — Erster Bericht. Grundl. Landtechnik Bd. 25 (1975) Nr. 5, S. 135/57.
- [2] Batel, W.: Staubbekämpfung am Arbeitsplatz auf fahrenden Arbeitsmaschinen. Grundl. Landtechnik Bd. 26 (1976) Nr. 2, S. 50/55.
- [3] Batel, W.: Methoden und Geräte zur Bestimmung des Staubgehaltes. Grundl. Landtechnik Bd. 26 (1976) Nr. 5, S. 178/87.
- [4] •Batel, W.: Einführung in die Korngrößenmeßtechnik. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1971.
- [5] Eriksson, H.A.: Preliminär rapport över damm- och klimatmätningar under säsongen 1975. Bericht des Jordbrukstekniska Institutet Uppsala Schweden v. 17.3.1976.

Flüssigmistfermentation mit Selbsterwärmung

Von Rudolf Thaeer und Klaus Grabbe,
Braunschweig-Völkenrode*)

*Mitteilung aus dem Institut für Landmaschinenforschung und dem Institut für Bodenbiologie
der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode*

DK 614.76:631.862

Durch eine Belüftung können dem Flüssigmist seine umweltbelastenden Eigenschaften, insbesondere die Geruchsentwicklung, dadurch genommen werden, daß die Tätigkeit der in ihm enthaltenen aeroben Mikroflora gefördert wird. Bei dieser Behandlung wird Wärme frei. Sie läßt sich zur Intensivierung des Abbaus organischer Stoffe und zur Hygienisierung nutzen. Aufgrund von Versuchen mit Rinderflüssigmist werden einige für die Selbsterwärmung und den gewünschten Stoffumsatz wichtige Faktoren und Zusammenhänge dargelegt und eine gewisse Bewertung verschiedener Verfahrensvarianten vorgenommen. Für eine abschließende Beurteilung bedarf es noch einer weiteren Klärung der sehr vielfältigen Wechselbeziehungen.

*) Dipl.-Ing. Dr. Rudolf Thaeer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landmaschinenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Baader), Dr. Klaus Grabbe am Institut für Bodenbiologie (Direktor: Prof. Dr. K.D. Domsch) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.

1. Einleitung

Die Flüssigmistfermentation ist ein Verfahren, in dem die Tätigkeit aerober Mikroorganismen unter folgenden Gesichtspunkten genutzt werden kann:

1. Verhinderung von Geruchsemissionen beim Lagern und Ausbringen des Flüssigmistes durch den Abbau von Stinkstoffen,
2. Hygienisierung des Flüssigmistes,
3. Verminderung des Arbeitsaufwandes durch Verringerung des Volumens und/oder der Viskosität des Flüssigmistes und
4. Erhaltung, in Ausnahmefällen auch Verminderung seines Düngewertes.

Erweiterte Fassung des Vortrages, gehalten auf der Internationalen Tagung Landtechnik des VDI am 23.10.1975 in Braunschweig.

Die Untersuchungen zu diesem Thema wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens "Die Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Agrar- und Ernährungswirtschaft durch eine neue Technologie der Milchgewinnung, Abstimmung des Futteraufwandes auf die Tierleistung und den Einsatz mikrobiellen Proteins aus Abfallprodukten in der Fütterung" vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten unterstützt.

An erster Stelle steht zumeist der Wunsch, die dem Flüssigmist eigene Geruchsemission, welche als Folge des Abbaus organischer Inhaltsstoffe durch anaerobe Mikroorganismen auftritt, zu verhindern. Durch künstliche Belüftung wird der aeroben Mikroflora Gelegenheit gegeben, die Faulstoffe abzubauen. Der Gestank verschwindet. Beim Abbau überwiegt die Mineralisation der organischen Substanz. Neben Kohlendioxid und Wasser wird vor allen Dingen Ammoniak freigesetzt, das unter Umständen in andere Stickstoffverbindungen überführt wird. Bei der Oxidation der organischen Substanz bildet sich je nach Art und Menge der Nährstoffe Biomasse, die sich aus den im Flüssigmist wachsenden Mikroorganismen zusammensetzt.

Wenn der Flüssigmist, wie zumeist, als Dünger aufs Land ausgebracht wird, braucht er nicht vollständig von seinen organischen Bestandteilen befreit zu werden, sondern es genügt entweder anaerobe Prozesse durch dauerndes oder intermittierendes extensives Belüften hintenan zu halten oder die rasch zersetzbaren Stoffe durch kürzeres, jedoch intensiveres Belüften soweit abzubauen, daß eine befristete Stabilität zustande kommt. Letzteres bezweckt die hier zu besprechende Fermentation.

2. Kalt-, Warm- und Heißfermentation

Die Fermentation kann im Kalt-, Warm- oder Heißverfahren betrieben werden. Kaltverfahren arbeiten mit Substrattemperaturen bis etwa 20 °C. Die Grenze zwischen Warm- und Heißverfahren sei mit Rücksicht auf die Stickstofftransformation bei 40 °C gezogen.

Von der Warm- und Heißfermentation werden gegenüber der Kaltfermentation folgende Vorteile erwartet:

- Rascherer, vielleicht auch stärkerer Abbau der organischen Substanz,
- verbesserte Hygienisierung,
- stärkere Volumenverminderung,
- Verbesserung der Fließfähigkeit und
- größere Frostsicherheit.

Nachteilig ist das verstärkte Auftreten von Ammoniakemissionen [1].

Über die Abhängigkeit des Abbaus von der Temperatur läßt sich aus dem Schrifttum kein einheitliches Bild gewinnen. Müller-Neuhaus [2, 3] ermittelte bei der getrennten aeroben Schlammstabilisierung im Bereich von 5 bis 35 °C einen mit der Temperatur zunehmenden Abbau. Eine ähnliche, aber nicht so ausgeprägte Temperaturabhängigkeit fand Weisbrodt [4] bei der aeroben Behandlung von Primärschlamm. In Versuchen von Rincke [5] mit Zuckerrübenmelasse nahm der Kohlenstoffgehalt bei 50 °C wesentlich schneller und weitergehend ab als bei 20 °C. In Versuchen anderer Autoren [6, 7] mit natürlichen oder künstlichen Abwässern wurde bei höherer Temperatur nur teilweise ein rascherer Abbau festgestellt, manchmal sogar ein langsamerer und schlechterer. Substrat und Betriebsbedingungen spielen offensichtlich eine große Rolle; denn prinzipiell steigt die Reaktionsgeschwindigkeit mit der Temperatur.

Die für die Heiß- und Warmfermentation erforderliche Wärme stammt in erster Linie aus den biologischen Umsetzungen. Wichtig ist, daß ein nicht zu großer Anteil dieser Wärme an die Umgebung verloren geht. Die Hauptwärmeverluste entstehen durch das Belüften. Deshalb hat die Flüssigmistfermentation bei erhöhten Temperaturen erst mit einem von Fuchs entwickelten speziellen Belüfter [8] Bedeutung erhalten. Eine Übersicht über das bisherige Schrifttum enthalten [9] und [10], siehe auch [11].

Als besonders günstig haben sich Saugbelüfter erwiesen, bei denen das Rührorgan Luft in das Substrat hineinsaugt. Aber auch bei Druckbelüftung mit getrenntem Rührwerk sind schon der Heißbehandlung entsprechende Temperaturen erreicht worden.

3. Versuchseinrichtungen und Versuchsdurchführung

Mit derartigen Geräten wurden Versuche mit Rinderflüssigmist in 25 m³-Behältern, die mit etwa 10 m³ Flüssigmist gefüllt waren, durchgeführt [10, 12]. Links auf Bild 1 ist der von Fuchs entwickelte Schildsaugbelüfter im Behälter arbeitend dargestellt. Die Luft wird von einem Schaufelrührer a durch das oben herausragende Rohr b in die Flüssigkeit gesaugt und mit ihr unterhalb des Schildes e umgewälzt. Zwei rotierende Schaumschneider d verhindern, daß der Schaum zu hoch ansteigt und überläuft. In den ersten Versuchen war der Behälter wärmeisoliert und teilweise mit einem Holzdeckel bedeckt. Im gleichen Behälter wurde der daneben abgebildete Leitrohrsaugbelüfter von Peters eingesetzt. Ein Scheibenrührer g saugt Luft und Schaum durch das Leitrohr f in die Flüssigkeit hinein. Beide Belüfter sind mit 4 kW-Motoren ausgerüstet. Gebrauchte wurden in den Versuchen 2–3 kW.

Anfangs wurden einige Standversuche durchgeführt, in denen der Fermenter nur zu Beginn mit Flüssigmist, gegebenenfalls unter Wasserzugabe, gefüllt wurde. Zumeist arbeitete der Fermenter aber im Chargenbetrieb, indem nach einer gewissen Anlaufzeit in Intervallen von einigen Tagen ein Teil des Inhaltes dem Behälter entnommen und durch frischen Flüssigmist ersetzt wurde. Wegen weiterer Angaben über die Versuche sei auf [10] und [12] verwiesen.

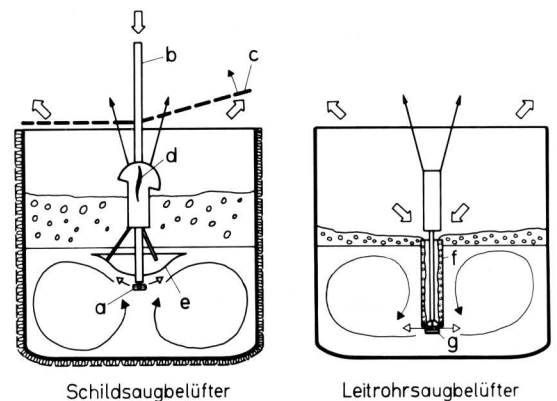


Bild 1. Belüfter für die Heiß- und Warmfermentation im 25 m³-Fermenter.

- | | |
|---------------------------|-------------------|
| a Schaufelrührer | d Schaumschneider |
| b Ansaugrohr | e Schild |
| c zu öffnender Holzdeckel | f Leitrohr |
| | g Scheibenrührer |

4. Ergebnisse

4.1 Temperatur

Bild 2 zeigt den Temperaturverlauf bei und nach einem teilweisen Auswechseln des Fermenter-Inhaltes. Die gestrichelte Kurve stellt die Atmungsaktivität OV der Mikroorganismen dar, die in mg Sauerstoffverbrauch je Liter und Stunde aufgetragen wurde. Unmittelbar nach der ersten Beschickung mit einer nur kleinen Flüssigmistmenge fiel die Atmungsaktivität kurzzeitig, stieg dann aber rasch an, um am nächsten Tag wieder abzunehmen. Nach der zweiten Beschickung, diesmal mit einer größeren Flüssigmistmenge, wobei wiederum eine Entnahme vorangegangen war, ging die Atmungsaktivität so sehr in die Höhe, daß sie nicht mehr erfaßt werden konnte. Zwei Tage nach der Zugabe fiel sie auf einen meßbaren Wert ab und nahm dann rasch wieder niedrigere Werte an. Der Verlauf der Atmungsaktivität zeigt, wie die Mikroorganismen durch das Angebot leicht abbaubarer Stoffe zu erhöhter Aktivität angeregt werden und nach Verbrauch dieser Stoffe ihre Tätigkeit reduzieren. Die Wärmeerzeugung geht mit der Atmungsaktivität parallel, der Temperaturverlauf wird aber noch von anderen Faktoren beeinflusst.

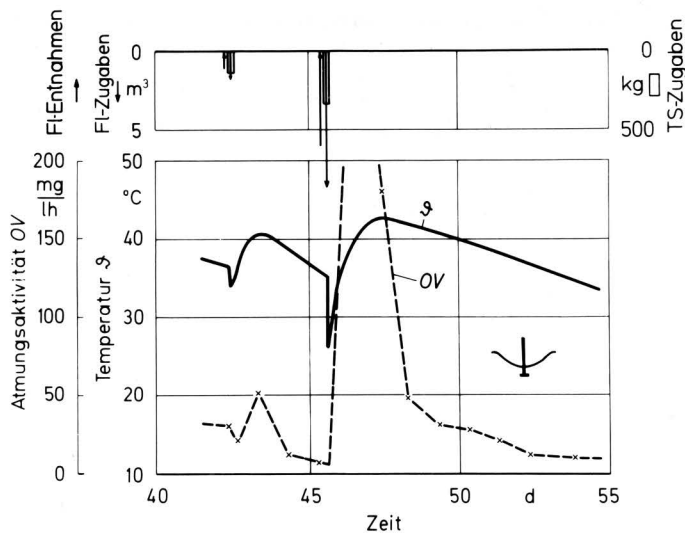


Bild 2. Verlauf von Temperatur ϑ und Atmungsaktivität OV bei Entnahmen und Zugaben in den laufenden Fermenter.

So zeigten sich charakteristische Unterschiede zwischen den beiden Belüftern, **Bild 3**. Mit dem Schildsaugbelüfter wird rasch ein Kulminationspunkt erreicht, der bei dem isolierten und zugedeckten Fermenter maximal 55 °C betrug. Dagegen stieg die Temperatur bei Einsatz des Leitrohrsäugbelüfers etwas langsamer, jedoch zum Teil bis auf mehr als 60 °C an, obwohl der Fermenter nicht isoliert und oben offen war. Neue Zugaben unterbrachen dann jeweils den Temperaturanstieg.

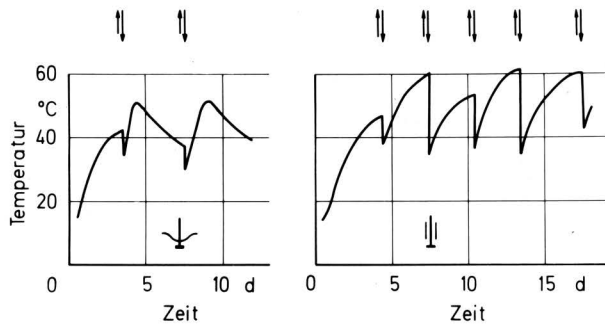


Bild 3. Charakteristischer Temperaturverlauf, links beim Einsatz des Schildsaugbelüfers (etwas schematisiert), rechts beim Einsatz des Leitrohrsäugbelüfers. Die Pfeile geben Entnahmen und Zugaben an.

Dies unterschiedliche Verhalten ist einmal dadurch zu erklären, daß die Schaumschneider des Schildsaugbelüfers oberhalb des Schaumes eine kräftige Luftströmung erzeugen, die unmittelbar, hauptsächlich aber infolge Verdunstung, das Substrat kühlt, zum anderen durch den unterschiedlichen Luftdurchsatz. Beim Schildsaugbelüfter betrug dieser etwa 100 m³/h, beim Leitrohrsäugbelüfter wurde er in schaumfreier Flüssigkeit zu rund 40 m³/h gemessen. Da in der Regel aber Schaum in das Leitrohr mit hineingesaugt wurde, lag der Luftdurchsatz während der Versuche noch unter diesem Wert.

Zum Verständnis der Temperaturentwicklung wurde eine Modellrechnung über die Abhängigkeit der Temperatur vom Luftstrom durchgeführt. In ihr sind kontinuierlicher Betrieb und voneinander unabhängige Variation von Rührintensität und Luftdurchsatz unterstellt. Zu berücksichtigen sind die auf **Bild 4** dargestellten zu- und abgeführten Wärmemengen.

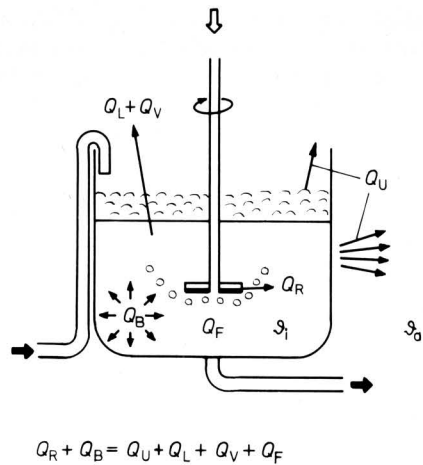


Bild 4. Aufgliederung der Wärmezu- und -abfuhr.

- Q_R durch Rühren erzeugte Wärme
- Q_B biologisch erzeugte Wärme
- Q_U Wärmedurchgang durch die Behälterwände und den Schaum (Konvektion und Strahlung)
- Q_L für die Erwärmung des Luftstroms aufgewandte Wärmemenge
- Q_V Verdunstungswärme
- Q_F für die Flüssigmisterwärmung verbleibende Wärme

Für die Modellrechnung wurden folgende, stark vereinfachende Annahmen getroffen:

Der mit dem Luftstrom eingebrachte Sauerstoff wird, solange den Mikroorganismen leicht verwertbares Substrat reichlich zur Verfügung steht, gleichbleibend zu 10 % ausgenutzt. Je g ausgenutzten Sauerstoffes wird die spezifische Energie 14,5 kJ erzeugt [13, 14]. Beim Überschreiten eines kritischen Luftstromes \dot{V}_{Lk} wirkt das Nahrungsangebot limitierend, die Sauerstoffaufnahme der Mikroorganismen und damit die biologische Wärmeerzeugung bleibt dann konstant. Die Luft tritt trocken in das Substrat ein und verläßt es wasserdampfgesättigt. Die Sättigungskurve wurde mit einer quadratischen Funktion grob angenähert. Die Luft und der Flüssigmist treten mit der Außentemperatur ϑ_a in den Fermenter ein und verlassen ihn mit der Substrattemperatur ϑ_i . Weiter ist eine einheitliche Wärmedurchgangszahl k für die flüssigkeitsbeaufschlagten Behälterwände und den Schaum sowie eine für den ganzen Behälter gleiche Temperaturdifferenz $\vartheta_i - \vartheta_a$ zugrunde gelegt. Gegen verschiedene dieser Annahmen lassen sich Einwände erheben. So ist die eintretende Luft nicht trocken und verläßt das Substrat auch nicht wasserdampfgesättigt, andererseits kann auch an der Schaumoberfläche Verdunstung auftreten.

Die in der Modellrechnung variierten Voraussetzungen sind in **Tafel 1** aufgelistet, die errechneten Temperaturverläufe auf **Bild 5** dargestellt.

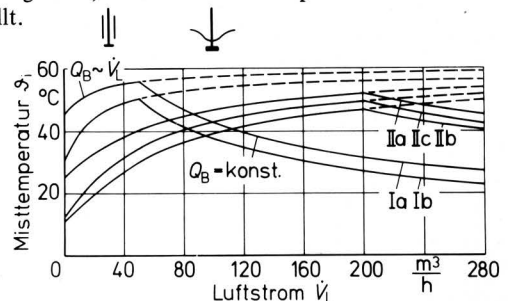


Bild 5. Temperaturverlauf in Abhängigkeit vom Luftstrom \dot{V}_L , Ergebnis einer Modellrechnung mit den in **Tafel 1** aufgeführten Daten. Die Symbole der Belüfter kennzeichnen deren Einsatzbereich.

Zugrunde gelegte Sauerstoffausnutzung:

- für $\dot{V}_L \leq \dot{V}_{Lk}$ 10 % des Sauerstoffangebotes
- für $\dot{V}_L > \dot{V}_{Lk}$ konstant gleich 10 % des Sauerstoffangebotes bei \dot{V}_{Lk}

| Variante | Netto-Fermenter-Volumen V | Flüssigm.-Durchsatz \dot{m}_F | wärmeabgebende äußere Flüssigmistoberfläche A | Wärmedurchgangszahl k | Rührerleistung P | Außentemp. ϑ_a | krit. Luftstrom \dot{V}_{Lk} |
|-----------|---------------------------|---------------------------------|---|-----------------------|------------------|--------------------------|--------------------------------|
| | m ³ | kg/d | m ² | kJ/m ² hK | kW | °C | m ³ /h |
| Ia | 10 | 600 | 31,5 | 4,2 | 2 | 15 | 50 |
| Ib | 10 | 600 | 31,5 | 4,2 | 2 | 0 | 50 |
| IIa | 40 | 2400 | 70 | 4,2 | 2 | 15 | 200 |
| IIb | 40 | 2400 | 70 | 4,2 | 2 | 0 | 200 |
| IIc | 40 | 2400 | 70 | 2,1 | 2 | 0 | 200 |
| Versuch 7 | 10,4 | 570 | 31,5 | 5,3 | 3 | 14,5 | |

Tafel 1. Der Modellrechnung zugrunde gelegte Daten sowie entsprechende Daten eines Versuches.

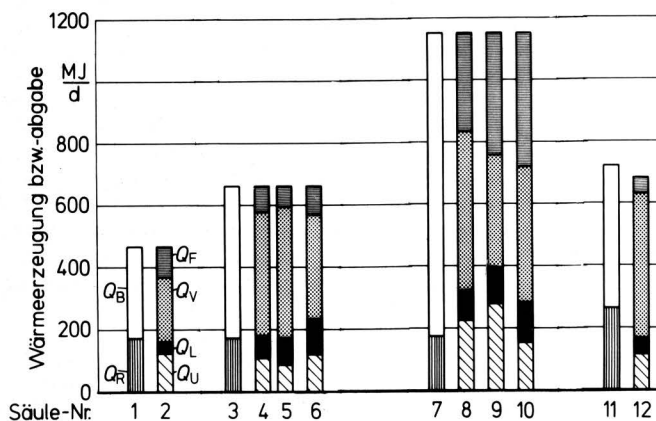
Zunächst sei die Variante Ia, die den Voraussetzungen der Versuche am nächsten kommt, betrachtet. Bei der hohen Leistungsdichte von 200 W/m³ tritt auch ohne Luftstrom, allein schon durch die Rührenergie, eine Erwärmung von 15 °C auf 45 °C ein. Wird belüftet, so kommt die biologisch erzeugte Wärme Q_B hinzu, gleichzeitig wachsen aber die Wärmeverluste progressiv. Infolgedessen steigt die Temperatur zunächst zwar weiter an, der Anstieg läßt aber nach, so daß die Temperatur sich bei Beibehaltung der Proportionalität zwischen Q_B und \dot{V}_L einer Temperatur von 60 °C asymptotisch nähern würde (gestrichelter Kurvenast). Beim kritischen Luftstrom $\dot{V}_{Lk} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ sind 56 °C erreicht. Da entsprechend der Annahme die Wärmeerzeugung für stärkere Luftströme nicht mehr anwächst, die Wärmeverluste aber weiter zunehmen, nimmt die Temperatur dann entsprechend dem ausgezogenen Kurvenast ab.

liegt die Temperatur beim Schildsaugbelüfter mit einem Luftdurchsatz $\dot{V}_L \approx 100 \text{ m}^3/\text{h}$ (siehe entsprechendes Symbol) mit rund 42 °C wesentlich niedriger. Wird der Luftstrom dieses Belüfters gedrosselt, so steigt die Temperatur an, was in den Versuchen mehrfach auftrat, siehe [10 u. 12].

Werden die gleichen Belüfter in größeren Behältern eingesetzt, wie es beim Schildsaugbelüfter beispielsweise in den Versuchen von Rüplich [15] und Wolfermann [16] geschah, so vermindert sich die Leistungsdichte. Entsprechend ist für die Variante IIa mit vierfachem Flüssigmistvolumen und vier-

fachem Flüssigmistdurchsatz eine Leistungsdichte von 50 W/m³ unterstellt. Die durch das Rühren eingebrachte Energie allein hebt deshalb die Substrattemperatur nur von 15 °C auf 25 °C an. Die Temperatur steigt langsamer mit dem Luftdurchsatz, würde aber bei unbegrenztem Substratangebot gleichwohl wiederum auf 60 °C zugehen. Der Anstieg bricht wegen der vierfachen Substratzufuhr erst bei einem Luftdurchsatz $\dot{V}_{Lk} = 200 \text{ m}^3/\text{h}$ ab. Infolgedessen wird der Luftstrom des Schildsaugbelüfters voll ausgenutzt. Es ergibt sich für ihn eine höhere Temperatur (47 °C) als im Falle Ia und auch als beim Leitrohrsaugbelüfter.

In den Beispielen Ib und IIb ist eine Außentemperatur von $\vartheta_a = 0 \text{ °C}$ statt 15 °C vorausgesetzt. Im unbelüfteten, nur gerührten Flüssigmist liegen die Temperaturen fast um die gleiche Differenz niedriger. Die Belüftung verursacht einen steileren Temperaturanstieg, verringert also die von der Außentemperatur herrührenden Differenzen. Durch bessere Wärmeisolation läßt sich die Temperatur anheben, im Beispiel IIc im Arbeitsbereich des Schildsaugbelüfters um etwa 4 K.



| Säule Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-----------------------------|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|----|
| Variante | I | a | I | a | a | b | II | a | b | c | Versuch 7 | |
| Wärmeerzeugung + | | | | | | | | | | | | |
| Wärmeabgabe - | + | - | + | - | - | - | + | - | - | - | + | - |
| Luftstrom m ³ /h | 30 | 30 | ≥50 | 70 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 67 | 67 |
| Temperatur °C | | 54 | | 49 | 42 | 38 | | 47 | 39 | 43 | | 41 |

Bild 6. Wärmebilanzen für die Varianten der Modellrechnung und für Versuch 7.

Die Luftförderung des Leitrohrsaugbelüfters betrage $\dot{V}_L = 30 \text{ m}^3/\text{h}$, wie durch das Belüftersymbol gekennzeichnet. Die Temperatur befindet sich dort mit 54 °C nicht weit vom Maximum. Dagegen

Bild 6 gibt die Wärmeerzeugung und die Wärmeabgabe sowie deren Aufteilung für spezielle Betriebszustände der besprochenen Varianten als Säulen wieder.

Das erste Säulenpaar gilt für den Betriebspunkt $\dot{V}_L = 30 \text{ m}^3/\text{h}$ der Variante Ia, entsprechend dem Leitrohrsaugbelüfter. Die Rührenergie (Q_R) liefert 37 %, die biologische Energie (Q_B) 63 % der erzeugten Wärme (Säule 1). Diese Wärme geht zu 26 % durch Konvektion und Strahlung verloren (Q_U), 8 % werden zur Aufwärmung des Luftstromes (Q_L), 45 % für die Verdunstung verbraucht (Q_V), 21 % dienen der Flüssigmisterwärmung (Q_F).

Da die Betriebspunkte $\dot{V}_L = 70$ und $100 \text{ m}^3/\text{h}$ der Varianten Ia und Ib über $\dot{V}_{Lk} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ liegen, gilt für deren Wärmeproduktion einheitlich die Säule 3 mit der Aufteilung in 26 % Energiezufuhr durch Rühren und 74 % biologisch erzeugte Energie. Der Hauptteil der Energie wird zur Wasserverdunstung verwendet, mit zunehmendem Luftdurchsatz ansteigend (vergl. Säule 5 mit 4).

Bei niedrigerer Außentemperatur mit zugleich niedrigerer Zulufttemperatur dominiert die Verdunstungswärme nicht mehr so stark (vergl. Säule 6 mit 5 und 9 mit 8).

Im größeren Fermenter wird bei gleichem Einsatz an Rührenergie mehr biologische Energie erzeugt (Säule 7). Von ihr verbrauchen Konvektion und Strahlung und die Flüssigmisterwärmung nicht nur absolut, sondern auch anteilmäßig mehr (vergl. Säule 8 mit 4 und 9 mit 5). Die Verdunstungswärme ist wegen der etwas höheren Temperatur in ihrem Absolutwert zwar etwas größer geworden, in ihrem Anteil aber beträchtlich zurückgegangen. Im wärmeisolierten Behälter (Säule 10) steht noch mehr Wärme zur Aufheizung des Flüssigmistes zur Verfügung.

Die Säulen 11 und 12 geben die aus den Daten eines Versuches (Nr. 7) errechneten Werte wieder [10]. Dieser Versuch wurde mit einem Schildsaugbelüfter im Chargenbetrieb mit rund siebentägigen Beschickungsintervallen gefahren. Infolgedessen schwankte die Temperatur des Flüssigmistes beträchtlich. Um Sedimentationen weitgehendst zu vermeiden, wurde mit einer sehr hohen Leistungsdichte – fast 300 W/m^3 – gearbeitet (siehe Tafel 1). Infolgedessen machte die Rührerenergie ein gutes Drittel der Wärmezufuhr aus (Säule 11).

Die Rechnung über die Wärmeabgabe (Säule 12) weist wegen versuchsbedingter Unsicherheiten einen Fehlbetrag auf. Die Verdunstungswärme wurde aus dem Flüssigkeitsschwund errechnet. Dieser war größer als die Wasserdampfmenge, die von der Luft beim Durchströmen des Substrates aufgenommen werden konnte. Das ist dadurch zu erklären, daß auch an der Schaumoberfläche Verdunstung stattfindet. Diese wird gefördert durch den Schaumschneider, der oberhalb der Schaumoberfläche eine kräftige Luftbewegung erzeugt und Schaum in die Luft verspritzt. Deshalb macht die Verdunstungswärme fast 70 % der Wärmeabgabe aus. Für die Berechnung der Flüssigkeitserwärmung Q_F wurde, soweit sie nicht das verdunstende Wasser betraf, die verhältnismäßig niedrige Flüssigmist-Entnahmetemperatur verwendet. Infolgedessen liegt der Betrag von Q_F niedrig. Berücksichtigt man diese Unterschiede sowie die Unterschiede in der Temperatur und der Wärmedämmung, so ist die Übereinstimmung der Säule 12 mit den Säulen 4 und 5 befriedigend.

Generell ist zur Modellrechnung zu sagen, daß sie bei den zum Teil recht unsicheren Prämissen nur ein Bild der Größenordnung und der Bedeutung der einzelnen Wärmequellen und Wärmeströme, somit Tendenzen, nicht aber Absolutwerte liefern soll.

4.2 Stoffumsatz

Sowohl bei der Lagerung als auch bei der aeroben Behandlung von Flüssigmist setzt sich der Harnstoff rasch in Ammoniak um, so daß hohe Ammoniakgehalte auftreten. Mit steigender Temperatur und steigendem pH-Wert – dieser nimmt bei der Heißbehandlung Werte von 8,5 bis 9 an – vermindert sich die Löslichkeit des Ammoniaks. Das freiwerdende Ammoniak wird vom Luftstrom mitgenommen. Infolgedessen ist die Ammoniakemission beim Einsatz des Schildsaugbelüfters mit seinem größeren Luftdurchsatz deutlich stärker als beim Einsatz des Leitrohrsaugbelüfters. In einem Standversuch mit dem Schildsaugbelüfter trat bei Temperaturen über 40°C länger als 16 Tage Ammoniak mit einer Rate von $0,1 \text{ g/l Flüssigmist und Tag}$ aus.

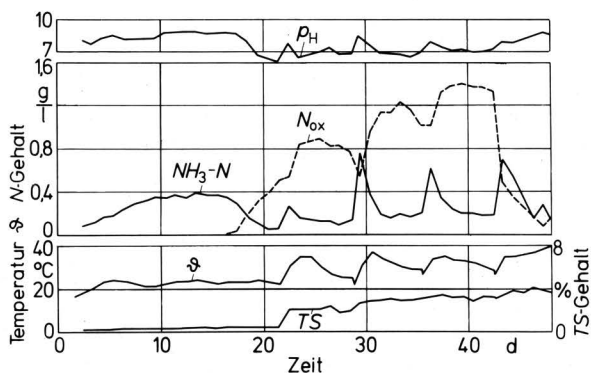


Bild 7. Warmbehandlung mit Nitrifikation und Denitrifikation.

N_{ox} Gehalt an oxidiertem Stickstoff, Nitrit- plus Nitrat-N

Die Ammoniakemissionen verschwinden rasch, wenn eine Nitrifikation d.h. die bakterielle Oxidation des Ammoniaks zu Nitrit oder Nitrat stattfindet. Die Nitrifikation läuft nur langsam an und läßt sich nur bei Temperaturen unter 40°C aufrecht erhalten. In dem auf **Bild 7** dargestellten Beispiel nimmt der Ammoniakgehalt infolge täglicher kleiner Flüssigmisteingaben in den mit Wasser gefüllten Fermenter etwa bis zum 15. Tage zu. Dann tritt die Um-

wandlung des Ammoniaks zu oxidiertem Stickstoff ein, was sich auch im pH-Wert ausdrückt. Nach größeren Zugaben von Flüssigmist – kenntlich am scharfen Absinken der Temperaturkurve – steigt die Ammoniakkonzentration nur kurzzeitig an. Die Nitrifikation läßt sie rasch wieder sinken.

Die Akkumulation oxidierten Stickstoffs wird am 43. Tage abrupt beendet. Es findet eine Denitrifikation statt, die Reduktion des Nitrits oder Nitrats vornehmlich zu molekularem Stickstoff, daneben auch zu anderen leicht entweichenden, geruchlosen Stickstoffgasen. Auch Ammoniak trat wieder aus. Die Denitrifikation findet in anaerobem Milieu statt. Das Ansteigen des Trockensubstanz-Gehalts auf 8 % führte auf dem nur am Rande ausgereinigten Fermenterboden zu undurchlüfteten Ablagerungen. Da sich bei stärkerer Wölbung des Bodens Ablagerungen leichter hinstellen lassen [17], konnte in einem mit Klöpperboden versehenen Fermenter der TS-Gehalt bis auf 9,5 % erhöht werden, bis die Denitrifikation eintrat. Auch durch Herablassen des Rührers in eine bodennähere Stellung ließ sich die Denitrifikation unterdrücken.

Bild 8 zeigt Stoffbilanzen von drei verschiedenen Versuchen. In den mit 7 und 9 E bezeichneten Versuchen war der Schildsaugbelüfter, im Versuch 10 der Leitrohrsaugbelüfter eingesetzt. Im Versuch 9 E lag die Temperatur niedriger. Es fanden Nitrifikation und Denitrifikation statt. Im Versuch 10 wurde der Flüssigmist häufiger ausgetauscht.

Die durch Verdunstung hervorgerufene Volumenabnahme und der Abbau organischer Substanz sind beim Schildsaugbelüfter infolge des höheren Luftdurchsatzes wesentlich größer als beim Leitrohrsaugbelüfter, bei der höheren Temperatur des Versuches 7 größer als beim Versuch 9 E. Der geringe Abbau beim Einsatz des Leitrohrsaugbelüfters hängt, wie schon gesagt, mit dessen kleinerem Luftdurchsatz zusammen.

Die Stickstoffverluste liegen in den Versuchen 7 und 9 E in ihren Absolutwerten mit je 1 kg/d gleich hoch, im Versuch 10 mit $0,75 \text{ kg/d}$ niedriger. In den Versuchen 7 und 10 ging der Stickstoff durch Ammoniakemission verloren, im Versuch 9 E durch Denitrifikation. In einer vierwöchigen Periode dieses Versuches, in der die Nitrifikation nicht von der Denitrifikation begleitet war, blieb der Stickstoff dagegen vollständig erhalten.

Sofern im Flüssigmist eine Oxidation des Stickstoffs stattgefunden hatte, wiesen ihm entnommene Proben einen angenehm erdigen Geruch auf. Unbelüftet blieben sie 2–16 Wochen lang ohne belästigenden Geruch. Bei niedrigem TS-Gehalt hielten sie sich länger in diesem Zustand als bei hohem. Auch der Gehalt an oxidiertem Stickstoff zeigte einen gewissen Einfluß. Unter anaeroben Verhältnissen fungiert er als Sauerstofflieferant und trägt bis zu seinem vollständigen Aufbrauch zur Stabilität fermentierten Flüssigmistes bei.

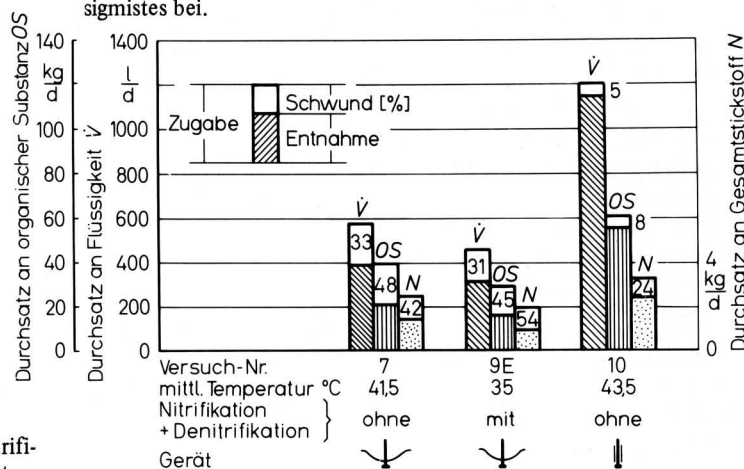


Bild 8. Mittlere Zugaben und Entnahmen sowie Schwund an Flüssigmist, organischer Substanz und Stickstoff, jeweils auf einen Tag bezogen, für drei charakteristische Versuche. Die Zahlen an den Säulenabschnitten für den Schwund geben den Schwundanteil in % an.

4.3 Hygienisierung

Untersuchungen von Hygieneinstituten im Rahmen unserer Versuche [18 u. 19] zeigten, daß Salmonellen und Parasiten bei Flüssigmisttemperaturen unter 40 °C nicht oder nicht hinreichend zuverlässig in wünschenswert kurzer Zeit absterben. Bei Temperaturen über 45 °C gehen sie nach 2 bis 5 Tagen zugrunde. Für das Abtöten von Salmonellen ist außerdem ein pH-Wert von über 8,7 erforderlich. In saurem Milieu können Temperaturen über 60 °C notwendig sein.

4.4 Zweistufige Fermentation

Die beschriebenen Versuche legten den Gedanken nahe, die Vorteile des Heißverfahrens, nämlich Hygienisierung, unter Umständen auch rascherer Abbau organischer Substanz, mit denen des Warmverfahrens, also Geruchfreiheit und bessere Stabilität, zu kombinieren.

Zu diesem Zweck wurden zwei Fermenter hintereinandergeschaltet. Der erste Fermenter arbeitete im Heiß-, der zweite im Warm- oder Kaltverfahren mit Nitrifikation. Im Fermenter 1 wurde der Leitrohrsaugbelüfter eingesetzt, weil er hohe Temperaturen gewährleistet und dort trotzdem nur relativ geringe Ammoniakemissionen verursacht. Die mit diesem Gerät erzeugte Temperatur von 60 °C erwies sich aber als ungünstig, weil bei hohem Durchsatz die Temperatur im zweiten Fermenter infolge der Zugabe des heißen Flüssigmistes mehrmals 40 °C überschritt und daher die Nitrifikation störte. Außerdem wurden in diesen Versuchen die kleinen Abbauraten festgestellt, die auf Bild 8 für den Versuch 10 dargestellt sind.

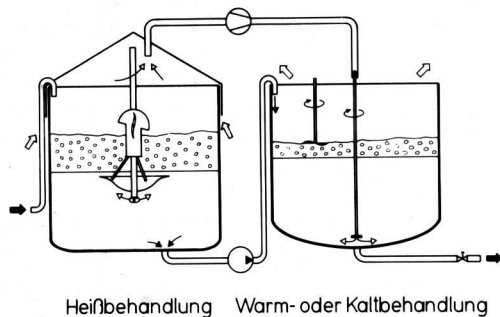


Bild 9. Zweistufige Fermentation mit Überleitung der Abluft des ersten Fermenters in den zweiten.

In einem weiteren Versuch wurde die Anordnung gemäß Bild 9 gewählt. Die Abluft des Fermenters 1 wird von einer Haube aufgefangen und zur Belüftung des Fermenters 2 benutzt. Das bei der Heißfermentation entweichende Ammoniak wird auf diese Weise dem zweiten Fermenter zur Nitrifikation zugeführt, und es treten keine unangenehmen Emissionen auf. Solange keine Denitrifikation stattfindet, bleibt der Stickstoff dem System erhalten. Eine Luftzuführung in dem ersten Fermenter zwischen Fermenterrand und Haube hat gegenüber einer Durchführung des Belüfteransaugrohres durch die Haube den Vorteil, daß in den beiden Fermentern mit verschiedenen Luftdurchsätzen gearbeitet werden kann. Der Versuch bestätigte diese Überlegungen. Die Geruchselimination war nahezu vollkommen. Es traten noch gewisse Schwierigkeiten wie Kondensatbildung und Korrosion des Verdichters durch den hohen Ammoniakgehalt der überzuleitenden Luft auf. Diese lassen sich durch eine geeignete Gestaltung der Leitung und Ersatz des Verdichters durch einen selbstansaugenden Belüfter im zweiten Fermenter beheben.

5. Beurteilung der Verfahren

Geruchsemissionen

Im Warmverfahren wird der Flüssigmist rasch emissionsfrei, und es wird eine begrenzte Stabilität erreicht. Bei längerer Lagerung muß

der Mist weiterbelüftet werden. Das Heißverfahren ist von Ammoniakemissionen begleitet. Ein geruchsfreies Produkt ist nur nach langer Behandlungsdauer zu erzielen. Nach Jensen [20] entspricht bei Schweinemist die Stabilität dann der Behandlungsdauer. Im zweistufigen Verfahren kann das entweichende Ammoniak aufgefangen und rasch ein geruchsfreier Mist ebenfalls begrenzter Stabilität erhalten werden.

Hygienisierung

Zur Hygienisierung muß der Mist heiß behandelt werden. Da Stoffumsetzungen zur Abtötung beitragen, kann die Temperatur bei bestimmten Krankheitserregern niedriger liegen als bei einer Pasteurisierung. Gegenüber Anlagen zur Pasteurisation ist eine Fermentationsanlage einfacher zu erstellen und zu betreiben. Nur selten wird aber in der Landwirtschaft die Hygienisierung so im Vordergrund stehen, daß allein ihretwegen eine Fermentationsanlage gerechtfertigt ist. Wenn bei der Planung entsprechende Vorkehrungen getroffen werden, ist es möglich, eine Anlage normal im Warmverfahren und nur beim Auftreten von Krankheitserregern im Heißverfahren zu betreiben.

Volumenverminderung

Durch Verdunstung kann im Heißverfahren eine beträchtliche Volumenverminderung erreicht werden. Für sich alleine ist sie zu teuer erkaufte. Sie ist nur als Beigabe zu betrachten.

Düngewert

Von den für die Pflanzendüngung wichtigen Inhaltstoffen des Flüssigmistes werden durch die Behandlung der Gehalt an Kohlenstoff und Stickstoff beeinflusst. Der Kohlenstoffgehalt wird bewußt vermindert. Huminstoffe bilden sich nicht; dies unterscheidet die Flüssigmistfermentation von der Kompostierung festen Materials. Mit Stickstoffverlusten ist immer zu rechnen. Ihre Höhe richtet sich nach Art und Intensität der Behandlung. Durch Nitrifikation mit anschließender Denitrifikation, evtl. unter Zugabe von Kohlenstoffträgern, kann der Stickstoff für den Fall, daß Ausbringflächen knapp sind, minimiert werden. Das Austreiben des Ammoniaks ist als langwieriger und umweltbelastigender Prozeß für diesen Zweck nicht zu empfehlen. Falls nach der Nitrifikation die Denitrifikation vermieden wird, bleibt neben dem organisch gebundenen Stickstoff der übrige als Nitrit oder Nitrat ebenfalls erhalten. Wird der Stickstoff in dieser Form Pflanzen zugeführt, so wird er gut genutzt. Falls keine Vegetation vorhanden ist, wird er vom Bodenwasser weggespült, möglicherweise ins Grundwasser, wo er eine Gefahr darstellen kann. Deshalb ist die Nitrifizierung nur unter bestimmten Voraussetzungen positiv zu beurteilen. Außerdem ist es schwierig und aufwendig, die Denitrifikation bei der Lagerung zu vermeiden. Zwecks Stickstoffhaltung sollte deshalb die Belüftung nicht intensiver als notwendig betrieben werden.

Kosten

Weil optimale Verhältnisse für die Klärung der im Vordergrund stehenden Fragen des Stoffumsatzes angestrebt wurden, lag in den beschriebenen Versuchen die spezifische Antriebsleistung der Belüfter sehr hoch. Es wurde mit Leistungsdichten von 200 bis 300 W/m³ gearbeitet. Diese führen zu sehr hohen Kosten. Von anderen Versuchsanstellern in größeren Behältern durchgeführte Versuche begnügten sich mit niedrigeren Leistungsdichten. Wolfemann [16] wandte eine Leistungsdichte von 50 W/m³ an und kam somit auf einen Energiebedarf von 10 kWh/m³ Flüssigmist. Allerdings erreichte er daher nur in Schweinemist und zudem nur gelegentlich den für eine Hygienisierung notwendigen Temperaturbereich über 40 °C. Ohne Nachbelüftung können nach seinen Daten 3,50 DM/m³ Flüssigmist ausreichen. Mit nachfolgender Belüftung in den Lagertanks errechnete er Kosten von 10,60 DM/m³ Flüssigmist.

Verbesserungsmöglichkeiten

Sicherlich sind noch nicht alle Möglichkeiten des Heiß- und Warmverfahrens ausgeschöpft. Einige wichtige Zusammenhänge wie die zwischen Temperatur, Abbaugeschwindigkeit, Abbaugrad und Stabilität bedürfen noch weiterer Klärung. Die Ausnutzung des eingebrachten Sauerstoffes und damit die Ausnutzung der aufgewendeten Energie läßt sich offensichtlich noch verbessern. Hierfür sprechen gelegentlich festgestellte hohe Sauerstoffzufuhrwerte. Bei

sparsamem Lufteintrag ist mit einem geringeren Stickstoffverlust zu rechnen. Das zweistufige Verfahren läßt sich vielleicht in der Weise vereinfachen, daß der zweite Fermenter gleichzeitig als Lagerbehälter dient.

Erst nach Klärung dieser und noch anderer offener Fragen kann das Verfahren endgültig gewertet werden.

6. Zusammenfassung

Die Flüssigmistfermentation mit Selbsterwärmung wurde vornehmlich im Hinblick auf Temperaturentwicklung und Stoffumsatz untersucht. In Versuchen in halbtechnischem Maßstab wurde eine starke Abhängigkeit der erreichten Maximaltemperatur vom Aufbau und Einsatz des Belüftungsgerätes gefunden, was sich anhand einer Modellrechnung erklären ließ. In Beispielen mit unterschiedlichem Fermenterinhalt, bei denen die Rührenergie einer Leistungsdichte von 50 bzw. 200 W/m³ entspricht, wurden ein bis drei Viertel des Temperaturanstieges allein durch die Rührenergie – ohne Lufteintrag – hervorgerufen. Der Lufteintrag setzt infolge der von ihm bewirkten exothermen biologischen Reaktion das Mehrfache an Energie frei, führt jedoch gleichzeitig, insbesondere durch Verdunstung, Wärme ab. Da bei Steigerung des Luftdurchsatzes die biologischen Umsatzen aus Mangel an Substrat mit dem Luftdurchsatz nicht Schritt halten, kommt es schließlich zu einem Temperaturabfall.

Bei Temperaturen über 40 °C tritt in starkem Maße Ammoniak aus, unter 40 °C kann eine Oxidation des Stickstoffes eintreten, die die Geruchsemission unterbindet und zu einem nahezu geruchsfreien Behandlungsprodukt führt. Nach einigen Wochen stinkt es jedoch wieder. Da andererseits eine rasche Hygienisierung nur bei Temperaturen über 40 °C zu erreichen ist, wurde mit Erfolg eine Koppelung des Heiß- mit dem Warmverfahren erprobt.

Zwar ließen sich schon einige Charakteristika der Verfahren herausstellen, eine endgültige Wertung ist aber erst nach der Klärung noch offener Fragen möglich.

Schrifttum

- [1] *Traulsen, H.*: Verfahren zur Beseitigung tierischer Exkremate. KTBL-Ber. über Landtechnik Nr. 147 (1971).
- [2] *Müller-Neuhaus, G.*: Die getrennte aerobe Schlammstabilisierung. gwf-wasser/abwasser Bd. 112 (1971) S. 392/95.
- [3] *Müller-Neuhaus, G.*: Untersuchungen über die getrennte Schlammstabilisierung und Folgerungen für die Praxis. Ber. aus d. Institut für Wasserwirtsch. u. Gesundheitsing. TU München 1972. Nr. 5, S. 181/214.
- [4] *Weisbrodt, W.*: Aerobe Behandlung von Primärschlamm. Stuttgarter Ber. zur Siedlungswasserwirtschaft Bd. 51, München 1974.
- [5] *Rincke, G.*: Auftreten und Einfluß thermophiler Prozesse bei der aeroben Stabilisation. In: Gewässerschutz, Wasser, Abwasser Bd. 6 "Behandlung und Beseitigung von Abwässerschlämmen". Bearb. von B. Böhnke, Aachen 1971, S. 25/36.
- [6] *Viehl, K. u. B. Meiszner*: Über den Einfluß der Temperatur und der Jahreszeit auf die biologische Abwasserreinigung. Zbl. für Bakteriologie, Parasitenkunde u. Infektionskrankheiten. 2. Abt. Bd. 91 (1934/1935) S. 14/39.
- [7] *Husmann, W. u. F. Malz*: Untersuchungen zur biologischen Abwasserreinigung auf aerober thermophiler Grundlage. gwf-wasser/abwasser Bd. 89 (1959) S. 189/93.
- [8] *Pöpel, F.*: Aufbau, Wirkungsweise und Förderleistung von Umwälzbelüftern. Landtechn. Forsch. Bd. 18 (1970) S. 138/40.
- [9] *Loll, U.*: Stabilisierung hochkonzentrierter organischer Abwässer und Abwasserschlämme durch aerob-thermophile Abbauprozesse. Diss. TH Darmstadt 1974.
- [10] *Thaer, R., R. Ahlers u. K. Grabbe*: Behandlung von Rinderflüssigmist. 1. Teil: Behandlung in aeroben Verfahren mit erhöhten Temperaturen. Ber. üb. Landw. Sonderheft 192 (1975) S. 836/81.
- [11] *Tjernshaugen, O.*: Våtkompostering av husdyrgjødsel og pressaft, porsjonsbehandling (Liquid composting of livestock manure, batch treatment). Norges landbrukshøgskole, Institutt for bygningsteknikk. Meldning nr. 74, Ås 1974.
- [12] *Thaer, R., R. Ahlers u. K. Grabbe*: Untersuchungen zum Prozeßverlauf und Stoffumsatz bei der Fermentation von Rinderflüssigmist bei erhöhten Temperaturen. Landbauforsch. Völknerode Bd. 23 (1973) S. 117/26.
- [13] *Cooney, C.L., D.I.C. Wang u. R.I. Mateles*: Measurement of heat evolution and correlation with oxygen consumption during microbial growth. Biotechn. Bioeng. Bd. 11 (1968) S. 269/81.
- [14] *Mateles, R.I.*: Calculation of the oxygen required for cell production. Biotechn. Bioeng. Bd. 13 (1971) S. 581/82.
- [15] *Rüprich, W. u. P. Jäger*: Einsatz des Umwälzbelüfters für die Flüssigmistaufbereitung. Unveröff. Forschungsber. des Max-Planck-Institutes f. Landarbeit und Landtechnik, Bad Kreuznach 1973.
- [16] *Wolferrmann, H.-F., J. Hornig u. D. Klingenschmitt*: Untersuchungen zur Flüssigkompostierung von Flüssigdung durch Umwälzbelüftung mit dem Ziel der Geruchsminderung und Entseuchung. Unveröff. Forschungsber. des Max-Planck-Institutes f. Landarbeit und Landtechnik, Bad Kreuznach 1974.
- [17] *Kneule, F. u. P.M. Weinspach*: Suspendieren von Feststoffpartikeln im Rührgefäß. Verfahrenstechnik Bd. 1 (1967) Nr. 12, S. 531/40.
- [18] *Wassen, H.*: Hygienische Untersuchungen über die Verwendbarkeit der Umwälzbelüftung (System *Fuchs*) zur Aufbereitung von flüssigen Abfällen aus dem kommunalen und landwirtschaftlichen Bereich. Diss. Uni. Gießen 1975.
- [19] *Enigk, K., R. Thaer, A. Dey-Hazra u. R. Ahlers*: Die Lebensfähigkeit parasitärer Dauerformen bei der Fermentation von Rinderflüssigmist unter erhöhten Temperaturen. Zbl. Vet. Med. B, Bd. 22 (1975) S. 687/702.
- [20] *Jensen, F.-H.*: Die Wirkung aerober Schweineflüssigdungbehandlung auf die Geruchsminderung. Diss. Uni. Kiel 1974.