

Zur Bedeutung des Luftporenvolumens für die Kompostierung organischer Schlämme

Von Frank Schuchardt, Braunschweig-Völkenrode*)

Mitteilung aus dem Institut für Technologie der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode

Professor Dr.-Ing. Wolfgang Baader zum 60. Geburtstag

DK 631.862:631.879.4

Neben dem Angebot einer geeigneten Nahrungsquelle ist die ausreichende Versorgung mit Sauerstoff und Wasser für das Wachstum und die Vermehrung der aeroben Mikroorganismen bei der Kompostierung eine notwendige Voraussetzung. Hierfür muß durch die mechanische Aufbereitung der Komponenten für die Kompostierung eine Schüttung mit einem hohen Luftporenanteil geschaffen werden. Anhand von Beispielen von Gemengen aus organischen Schlammern mit unterschiedlicher Konsistenz (Flüssigmist, Hühnerkot, separierte Feststoffe aus Flüssigmist, Klärschlamm, Dickschlempe) und wassersorbierenden Trockenstoffen (Stroh, Rückgut) wird die Bedeutung des Luftporenvolumens im Haufwerk für die Kompostierung dargestellt.

1. Einleitung

Die Kompostierung organischer Reststoffe ist ein Verfahren, das für die Abfallwirtschaft zunehmende Bedeutung gewinnt. Dazu trägt zum einen das Verwertungsgebot des Abfallbeseitigungsgesetzes bei und zum anderen ein knapper und damit teurer werdendes Deponievolumen für die Abfälle der Kommunen (z.B. Hausmüll, Klärschlamm, Grünmüll). Auch wenn eine Verwertung des Kompostes nicht in allen Fällen möglich ist, z.B. wegen erhöhter Schadstoffgehalte, kann die starke Volumenreduktion durch den Rotteprozeß, die 50–70 % betragen kann, für die Abfallwirtschaft von Interesse sein. Bei organischen Reststoffen aus der Forst- und Landwirtschaft ist es in den letzten Jahren im größeren Umfange gelungen, marktfähige Kompost- bzw. Mulchprodukte herzustellen.

Für die verschiedensten organischen Reststoffe sind zahlreiche Verfahren und Maschinen entwickelt worden, deren Einsatz durch die Zusammensetzung, Struktur und Konsistenz der Reststoffe sowie besonderen Erfordernisse der Entseuchung, Automatisierung, Umweltbelastung und die Kosten bestimmt wird. Die genannten Einflußfaktoren bedingen auch, daß es nur beschränkt Standardverfahren zur Kompostierung gibt und eine Verfahrensplanung für den jeweiligen Einzelfall notwendig ist. Ziel jedes Kompostierungsverfahrens ist es, aus den Reststoffen in möglichst kurzer Zeit einen verwendungsfähigen Kompost herzustellen, der frei ist von Krankheitserregern und Unkrautsamen, wurzelverträglich, rieselfähig und streubar ist sowie einen erdigen Geruch hat. Voraussetzung für das Erreichen dieser Ziele ist eine substratspezifische Prozeßführung, die sich an den Milieuanprüchen der an der Rotte beteiligten Mikroorganismen ausrichtet hat. Dazu müssen sowohl die substratspezifischen Eigenschaften als auch die Milieuanprüche der Organismen bekannt sein.

*) Dr. agr. F. Schuchardt ist Wissenschaftlicher Oberrat am Institut für Technologie (Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Baader) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.

Während die Abbauprozesse bei der Kompostierung im wesentlichen bekannt und beschrieben sind [z.B. 1, 2, 3, 4], ist das Wissen über die substratspezifischen Eigenschaften, insbesondere die Struktur des Komposthaufwerkes und deren Auswirkungen und Wechselbeziehungen zu mikrobiellen Aktivitäten, unvollkommen [z.B. 3, 5]. Unter Struktur ist die Art der räumlichen Anordnung der gasförmigen, flüssigen und festen Bestandteile zu verstehen.

Ein Komposthaufwerk kann als ein System mit den Phasen "fest", "flüssig" und "gasförmig" betrachtet werden, Bild 1. Dabei ist die feste Phase, die die Stützstruktur des Haufwerkes bildet, von der flüssigen Phase befeuchtet, durchtränkt bzw. in dieser suspendiert. Die gasförmige Phase bildet mit der fest-flüssigen Phase ein poröses Haufwerk, das mit der Normalatmosphäre oder einem Zwangsbelüftungssystem in Verbindung steht.

Der Luftvolumenanteil λ_L am Gesamthaufwerk läßt sich berechnen aus

$$\lambda_L = \frac{\rho_H}{\rho_T} (1 - U_G) - \rho_H U_G$$

Es sind ρ_H Schüttdichte des Haufwerkes,
 U_G Feuchtegehalt des Gemenges,
 ρ_T Dichte der festen Phase.

Das Gesamt-Porenvolumen λ_P ergibt sich aus

$$\lambda_P = \lambda_L + \lambda_W$$

und der Volumenanteil λ_T am Haufwerk aus

$$\lambda_T = 1 - \lambda_P$$

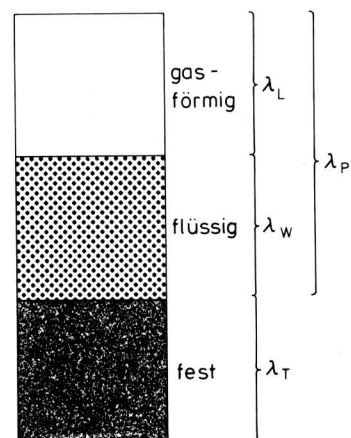


Bild 1. Drei-Phasen-System Kompost.

λ_L = Luftvolumenanteil; λ_W = Wasservolumenanteil;
 λ_T = Trockenstoffvolumenanteil; λ_P = Gesamtporenvolumenanteil

Eine Beeinflussung der Struktur von Komposthaufwerken durch technische Maßnahmen ist möglich durch die Art und Intensität der Zerkleinerung der Komponenten, die die feste Phase bilden, aber auch durch deren Auswahl. Das betrifft z.B. deren Sorptionsvermögen und -geschwindigkeit, die Festigkeit und Elastizität im feuchten Zustand, die Teilchengröße und die Dichte. Daneben ist es auch durch mechanische Verfahrensschritte während der Rotte möglich, die Struktur zu beeinflussen, z.B. durch Umsetzen, Mischen und/oder Belüften.

Als ein besonders schwierig kompostierbares Gut gelten wegen ihrer Strukturlosigkeit und des fehlenden Luftvolumens organische Schlämme. Aus Schrifttumangaben sowie Versuchen mit organischen Schlämmen und Gemengen aus organischen Schlämmen und verschiedenen Zuschlagstoffen wird die Bedeutung des Luftvolumenanteils im Haufwerk für die Kompostierung abgeleitet.

2. Der Kompostierungsprozeß

Im Bild 2 sind die Stoffumsetzungen während des Kompostierungsprozesses schematisch dargestellt. Die Hauptkomponenten des organischen Materials sind Eiweiße, Aminosäuren, Fette, Kohlenhydrate, Cellulose, Hemicellulosen, Lignin und Asche. Daneben ist in organischem Material derartiger Zusammensetzung eine Mischpopulation von Mikroorganismen (Bakterien, Pilzen, Aktinomyceten) anzutreffen, die sich bei ausreichendem Wasser- und Sauerstoffangebot vermehren. Die Kohlenstoffverbindungen und die Energie zum Aufbau der Mikroorganismen stammen dabei aus den leicht abbaubaren Kohlenhydraten, der Cellulose und den Fetten, die Stickstoffverbindungen aus den Eiweißen, Aminosäuren und anorganischen Stickstoffverbindungen. Entsprechend dem mittleren C/N-Verhältnis von 4,3 bei Bakterien bzw. von 8,6 bei Pilzen und 10 bei Aktinomyceten [4] ist ein C/N-Verhältnis im Substrat, das dem der Mikroorganismen möglichst nahekommt, für deren optimale Vermehrung als günstig anzusehen.

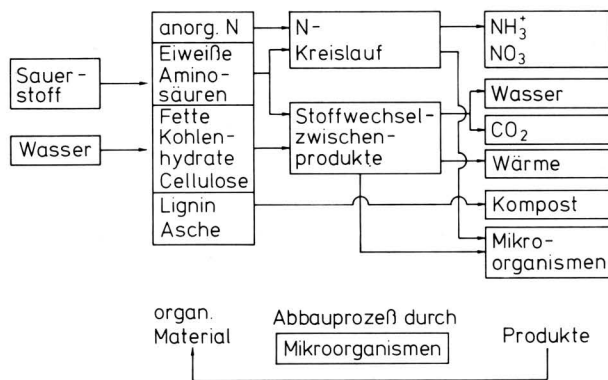


Bild 2. Schematische Darstellung der Stoffumsetzungen beim Kompostierungsprozeß.

So kann es bei organischen Stoffen mit einem engen C/N-Verhältnis von 8 bis 15 (tierische Exkremente, Klärschlamm) innerhalb einiger Stunden zu einem Temperaturanstieg durch Selbsterhitzung auf 70–75 °C kommen [6]. Der Nachteil eines engen C/N-Verhältnisses ist der vergleichsweise hohe Verlust an Stickstoff in Form von gasförmigem Ammoniak aus dem Stickstoffkreislauf. Diese Verluste können über 50 % des Gesamt-Stickstoffs betragen.

Die Produkte des Abbauprozesses sind aus dem Stickstoffkreislauf gasförmiges Ammoniak, Nitrat bzw. Nitrit, aus dem Stoffwechsel Wasser, Kohlendioxid und Wärme sowie Mikroorganismen. Die Mikroorganismen gehen nach ihrem Tod selbst in den Abbauprozess ein und bilden in erster Linie eine Stickstoffquelle. Die schwer bzw. nicht abbaubaren Bestandteile des organischen Materials, wie

Lignin, lignininkrustierte Cellulose sowie inerte Stoffe gehen in den Kompost mit ein. So besteht ein rottendes Haufwerk aus einem Gemisch fester, flüssiger und gasförmiger Komponenten aus dem organischen Material, Mikroorganismen sowie Stoffwechselzwischen- und Abbauprodukten. Durch den Stoffwechsel wird ein Teil der Energie in Wärme umgesetzt, was zur Temperaturerhöhung führt. Mit fortschreitendem Abbau und Verarmung der C- und N-Quellen im Ausgangsmaterial sowie der Bildung von Ton-Humus-Komplexen entsteht das gewünschte Produkt Kompost.

Die mikrobielle Aktivität ist an die Anwesenheit von Wasser gebunden, da die Mikroorganismen durch die semipermeable Zellwand nur molekular gelöste Stoffe aufnehmen können, die eine geringere Konzentration haben als die des Protoplasmas im Zellinnern. So müssen die Nährstoffe in wasserlöslicher Form vorliegen bzw. wie z.B. bei Cellulose enzymatisch in diese Form gebracht werden. Bei Wassermangel, etwa bei Feuchtegehalten unter 20 %, können sich die osmotischen Verhältnisse derart verschieben, daß die Zellen absterben und der weitere Abbau unterbleibt. Der für die Energiegewinnung notwendige Sauerstoff zur Oxidation von Kohlenstoffverbindungen muß ebenfalls im Wasser gelöst sein, in dem auch die Stoffwechselprodukte zu finden sind.

Die Massentransporte an der Grenzfläche Gas/Wasser sind schematisch im Bild 3 zu sehen. Aus der Gasphase diffundiert Sauerstoff in die Flüssigphase und wird dort von den Mikroorganismen verbraucht, wodurch das Konzentrationsgefälle erhalten bleibt und den weiteren Sauerstofftransport bewirkt. Die Stoffwechselprodukte Kohlendioxid und Ammonium bzw. Ammoniak werden entgegen dem Konzentrationsgefälle in Richtung Gasphase transportiert. Das durch die Oxidation gebildete Wasser vergrößert einerseits die Masse der Wasserphase, die andererseits durch die Diffusion in die Gasphase verringert wird. Die Gasphase in einem Komposthaufwerk ist ein Gemisch mit den Hauptkomponenten Wasserdampf, Sauerstoff, Kohlendioxid, Ammoniak und Stickstoff. Um die Sauerstoffversorgung der aeroben Mikroorganismen zu sichern, ist daher ein ständiger Gasstrom notwendig, um das Konzentrationsgefälle an der Grenzschicht zwischen beiden Phasen aufrecht zu erhalten.

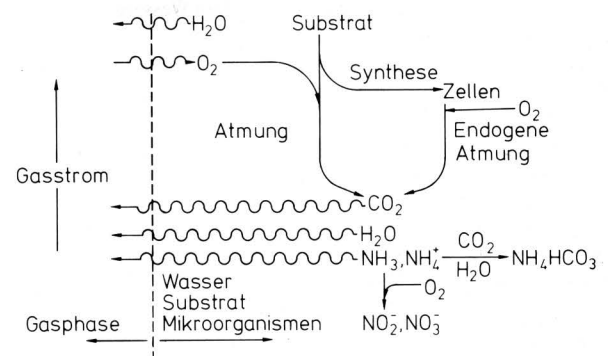


Bild 3. Schematische Darstellung der Stofftransporte an der Grenzfläche Gas/Wasser.

Die durch mikrobielle Oxidation entstehende Wärme wirkt sich unterschiedlich auf die Diffusionsverhältnisse aus. Einerseits nehmen die Sättigungswerte für Sauerstoff im Wasser stark ab, so daß bei Temperaturen zwischen 50 und 60 °C, bei denen mit dem höchsten Sauerstoffbedarf bei der Kompostierung zu rechnen ist, nur noch etwa 65–51 % der Sauerstoffmenge gelöst werden können, die bei 20 °C löslich ist, Tafel 1. Andererseits erhöht sich mit steigenden Temperaturen die Diffusionsgeschwindigkeit für Sauerstoff. Zudem wird durch Wärmeeintritt die Geschwindigkeit der Gasphase in den freien Poren des Komposthaufwerks erhöht, was zum schnelleren Austausch der Respirationsgase führt, aber auch Wasser, Ammoniak und Wärme aus dem biologischen Reaktions-

bereich abführt. Aus den vereinfacht dargestellten Vorgängen wird deutlich, daß es bei der Kompostierung nicht einen Wert für den "optimalen" Wassergehalt geben kann. Solange der flüssigen Phase genügend Sauerstoff zugeführt wird, ist theoretisch ein Wassergehalt im organischen Material von fast 100 % möglich, wie bei der Belüftung von Abwässern. Eine Verminderung des Wassergehaltes im organischen Material ergibt sich daher nur aus der Notwendigkeit, im Haufwerk Poren zu bilden, die nicht mit Wasser gefüllt sind. Dies ist wiederum von der Beschaffenheit und den Eigenschaften der strukturbildenden Fest- oder Zuschlagstoffe abhängig.

Temperatur °C	Sauerstoffsättigungswerte	
	bezogen auf Volumen mg/l	bezogen auf Wert für 20 °C %
10	10,9	124
20	8,8	100
30	7,5	85
40	6,6	75
50	5,7	65
60	4,5	51
70	2,0	23

Tafel 1. Sättigungswerte für Sauerstoff bei 1,013 bar in Abhängigkeit von der Wassertemperatur; nach Truesdale zit. in [7].

3. Luftporenvolumen in Schlämmen und Schlamm-Feststoff-Gemengen

Organische Schlämme wie Flüssigmist, Hühnerkot, Dickschlempe oder Klärschlamm sind wegen ihrer flüssigen bzw. pastösen Konsistenz (Tafel 2), Strukturlosigkeit, des hohen Wassergehaltes und des fehlenden Luftporenvolumens für die Kompostierung ungeeignet, zeichnen sich aber durch einen großen Anteil für Mikroorganismen leicht verfügbarer Nährstoffe aus. Die fehlende Struktur und der hohe Wassergehalt der Schlämme ist bedingt durch die geringe Größe und den hohen Anteil organischer Substanz in den Feststoffteilchen. Erst nach entsprechender Aufbereitung durch Wasserentzug, durch Trocknen oder Entwässern oder durch den Zusatz strukturbildender und feuchtesorbierender Feststoffe können Schlämme kompostiert werden. In Tafel 3 sind einige Möglichkeiten der Kompostierung organischer Schlämme, die für die Kompostierung optimalen Wassergehalte sowie die Schüttdichten und Luftvolumenanteile dargestellt.

3.1 Beispiele aus der Praxis

Eine Verringerung des Wassergehaltes im Schlamm kann über Veränderungen der Konsistenz zu einem luftporenhaltigen Haufwerk führen, in dem Kompostierungsprozesse möglich sind. Die Luftporen entstehen anfangs durch den Verlust von Zwischenraumwasser, später auch durch Verluste von Haft- und Kapillarwasser. Ein Wasserentzug durch Trocknung des Schlammes ist aus ökonomischen Gründen nur dann sinnvoll, wenn der Schlamm bereits in pastöser oder plastischer Form anfällt (z.B. Hühnerkot) oder durch Eindickung und mechanische Entwässerung nach Zusatz von Flockungsmitteln diese Konsistenz annimmt (z.B. Klärschlamm).

Beispiel 1: Bei Hühnerkot, der mit einem natürlichen Wassergehalt von etwa 78 % anfällt, gibt es verschiedene Verfahren der Feuchtereduktion im Stall [8]. Dabei wird Luft gezielt über die Kotbänder unterhalb der Käfige geführt oder der Kot über einen längeren Zeitraum in einem Keller unter den Käfigen gelagert. Die Abtrock-

Trockenmasse- gehalt %	Beschaffenheit	Beispiele
< 5	flüssig, wasserähnlich, pumpbar	Flüssigmist + Wasser, Überschußschlamm, Dünnschlempe
... 15	flüssig bis dickflüssig, pumpbar	Flüssigmist, Klärschlamm eingedickt, Dickschlempe
15 ... 25	dickflüssig, pastös, breiartig, pumpbar Puddingartig, schmie- rig, pumpbar	Hühnerkot, Dickschlempe Klärschlamm
> 15	stichfest, nicht pump- bar	separierte Feststoffe aus Flüssigmist
25 ... 30	pastös, plastisch, schmierend, stichfest, nicht pumpbar	Hühnerkot teilgetrocknet, Klärschlamm
30 ... 50	krümelig fest, stichfest, nicht schmierend	teilgetrocknete Schlämme
> 50	rieselfähig, krümelig, streufähig	teilgetrocknete Schlämme
> 80	sprödebrüchig, staub- förmig	getrocknete Schlämme

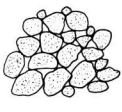
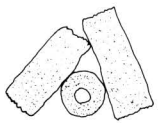
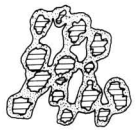
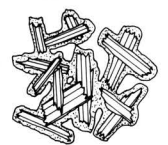
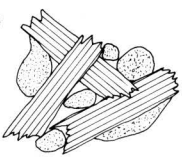
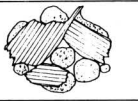
Tafel 2. Konsistenz und Beschaffenheit organischer Schlämme bei verschiedenen Trockenmassegehalten; nach [8], ergänzt.

nung des Kotes kann dabei so weit gehen, daß er anschließend ohne weitere Zuschlagstoffe und Aufbereitung kompostiert werden kann. Der dafür notwendige Trockensubstanzgehalt liegt nach eigenen Versuchen bei mindestens 40–45 % und einem Luftvolumenanteil von 40 %.

Mechanisch entwässerter bzw. eingedickter Klärschlamm läßt sich ebenso wie Hühnerkot nach einer Feuchtereduktion kompostieren. In verschiedenen Versuchen wurde diese Feuchtereduktion durch Wasserverdunstung nach Vergrößerung der Schlammoberfläche durch Bearbeitung mit lockernden Bodenbearbeitungswerkzeugen erreicht. Bei Wassergehalten von 50–70 % läßt sich die dann krümelige Substanz kompostieren. Bei 50 % Feuchtegehalt liegt das Wasser im Klärschlamm vorwiegend als Innen- und Adsorptionswasser vor, bei weiterer Zunahme des Feuchtegehalts bis 70 % nimmt der Anteil an Haft- und Kapillarwasser zu.

Beispiel 2: Um die Durchlüftbarkeit eines Haufwerkes aus vorge-trocknetem Schlamm zu verbessern, kann dieser zu Preßlingen aggregiert werden. Die notwendige Verminderung des Wassergehaltes orientiert sich dabei an der mechanischen Festigkeit der Preßlinge bei gleichzeitig ausreichendem Wasserangebot für die Mikroorganismen. Vorgetrockneter Hühnerkot ließ sich bei Wassergehalten von 59 % verpressen und kompostieren, wobei der Luftvolumenanteil 40 % betrug.

Alternativ zur Feuchtereduktion von Schlämmen für die Kompostierung läßt sich eine luftporenhaltige Schüttung durch Vermengen mit feuchtesorbierenden und strukturbildenden Additiven erreichen. Die Art der verwendeten Zuschlagstoffe ist abhängig von der Schlammkonsistenz und vom Kompostierungsverfahren. Zum Vermengen mit flüssigen Schlämmen sind trockene Stoffe mit hohem Wasserbindevermögen notwendig, die zudem das Wasser innerhalb kurzer Zeit binden können. Die optimalen Wassergehalte der Gemenge lagen zwischen 40 und 50 % bei Luftvolumenanteilen von 37–60 %.

Bei- spiel Nr.	Stoff	Quelle	Wasser- gehalt %	Schütt- dichte t/m ³	Luft- volumen %
vorgetrockneter pastöser Schlamm; Krümel					
1	 Klärschlamm Hühnerkot Feedlot-Mist	[9, 10, 11] [12, 13] [14] [15] [16]	50 ... 55 60 ... 70 — 59 40 ... 50	— — — 0,76 —	— — — 40 —
vorgetrockneter pastöser Schlamm; Gemenge aus Schlamm und Trockenstoff; Preßlinge					
2	 Hühnerkot Klärschlamm + Rückgut Klärschlamm + Müll, Sägemehl, Asche Hühnerkot + Rückgut Flüssigmist + Rückgut	[15] [17 bis 20] [21, 22] [23] [6, 24, 25]	59 40 ... 45 39 ... 46 40 ... 45 45 ... 50	0,75 0,55 ... 0,70 — 0,62 ... 0,72 0,61 ... 0,77	40 45 ... 60 — 42 ... 51 37 ... 50
Gemenge aus Schlamm und Trockenstoff					
3	 Hühnerkot + Sägemehl Hühnerkot + Torf Hühnerkot + Trockenrinde Hühnerkot + Schaumstoff Hühnerkot + Rückgut Klärschlamm + Sägemehl Klärschlamm + Rinde (gemahlen) Klärschlamm + Rückgut Klärschlamm + Papier Flüssigmist + Flüssigmist (getr.) Flüssigmist + Rückgut Flüssigmist + Sägemehl Flüssigmist + Rinde Flüssigmist + Torf	[26] [27] [15] [28] [28] [23] [29] [30] [31] [32, 33, 34] [35] [3] [3] [3] [36] [6, 24, 25] [36] [37] [36] [36] [38] [39] [15]	50 ... 64 — 70 ... 73 40 ... 60 40 ... 60 40 ... 50 70 65 45 25 ... 35 50 56 63 50 ... 55 63 40 ... 50 61 70 58 60 ... 65 83 80 70 ... 83	— — 0,45 ... 0,50 — — 0,45 ... 0,55 — — — — 0,68 0,50 0,40 — 0,24 0,50 ... 0,65 0,27 — 0,23 0,30 ... 0,49 — — 0,30 ... 0,59	— — 60 ... 70 — — 55 ... 62 — — — — — — 36 50 ... 60 37 — 41 33 ... 36 — — 45 ... 73
4	 Hühnerkot + Strohhäcksel Flüssigmist + Strohhäcksel Flüssigmist-Feststoff + Strohhäcksel	— [36] [38] [39] [40] [41]	— 56 ... 61 71 70 ... 82 75 75	— 0,29 ... 0,36 — 0,30 ... 0,65 0,40 0,30	— 36 ... 41 — 35 ... 80 65 73
5	 Klärschlamm + Stroh Hühnerkot + Stroh Dickschlemp + Stroh Festmist	[42] [15] [15] [15] [43] [44]	50 ... 60 72 ... 77 75 75 75 70 ... 85	— 0,42 ... 0,60 0,40 ... 0,50 0,40 ... 0,50 — 0,70 ... 0,90	— 50 ... 60 60 ... 65 60 ... 65 — —
6	 Klärschlamm + Hackschnitzel	[45] [46] [3]	60 55 ... 65 60	— — 0,73	— — —

— bedeutet: keine Angaben

Tafel 3. Beispiele für die Kompostierung organischer Schlämme und Gemengen aus organischen Schlämmen und Trockenstoffen.

Beispiel 3: Beim Vermengen von flüssigem oder auch pastösem Schlamm mit Rückgut (aus dem Kompost durch Trocknen und Mahlen gewonnen) entsteht ein Gemenge mit krümeliger Struktur und Luftporen geringen Durchmessers, das sich zwar kompostieren läßt, in dem aber bei größeren Schütthöhen (über 1,5 m) die Mikroorganismen nicht mehr in allen Teilen ohne Zwangsbelüftung ausreichend mit Sauerstoff versorgt werden können.

Durch die große Oberfläche der verwendeten feinkörnigen Trockenstoffe kann das Wasser aus den Schlämmen schnell kapillar, adsorptiv und adhäsiv gebunden werden. Durch die geringen Durchmesser der lufthaltigen Poren besteht die Gefahr einer Unterbrechung der Durchlüftung durch einen zu hohen Anteil an Hohlraumwasser. Die für die Kompostierung notwendigen Wassergehalte liegen je nach Kompostierungsverfahren und Stoffkomponenten zwischen 25 und 83 % bei Luftvolumenanteilen von 33 bis 73 %.

Beispiel 4: Statt Sägemehl oder Rückgut kann als Trockenstoff für die Kompostierung flüssiger Schlämme auch gehäckseltes Stroh verwendet werden. Der notwendige Zerkleinerungsgrad hängt von dem Trockensubstanzgehalt des Schlammes und dessen Konsistenz ab. Allgemein muß das Stroh um so stärker zerkleinert werden, je geringer der Trockensubstanzgehalt des Schlammes ist. Zudem ist eine Zerkleinerung des Halmes in Längsrichtung erforderlich, damit die nicht mit Wachs überzogenen inneren Teile des Halmes möglichst schnell Wasser binden können. Beim Vermengen von Stroh und Schweinflüssigmist mit einem Trockensubstanzgehalt von 7 % genügen in eigenen Versuchen 2–3 Minuten Mischzeit, um die Flüssigkeit bei einem Wassergehalt des Gemenges von 75 % vollständig zu binden. Sind längere Mischzeiten (z.B. in einem Chargenmischer) möglich, so kann die Zerkleinerungsintensität des Strohes reduziert werden. Die Wassergehalte in den Gemengen betragen 56–82 %, die Luftvolumenanteile 35–80 %.

Beispiel 5: Für die Kompostierung pastöser Schlämme ist eine Zerkleinerung des Strohes nicht notwendig, da der Schlamm kein frei fließendes Hohlraumwasser enthält und daher keine schnelle Bindung des Wassers notwendig ist. Dem Stroh kommt in erster Linie eine Stützfunktion im Haufwerk zu, obwohl es nach einiger Zeit in der Rotte durchfeuchtet wird und selbst dem Abbau unterliegt. Beim Mischen der beiden Komponenten kommt es vorwiegend darauf an, den Schlamm gleichmäßig im Stroh zu verteilen, wobei es ausreicht, wenn er auf das Stroh "geschmiert" wird oder in Aggregaten bis maximal Faustgröße vorliegt. Beim weiteren Umsetzen der Mieten und durch Wasserverluste durch Verdunstung werden diese Aggregate mit der Zeit zerkleinert und unterliegen vollständig dem Kompostierungsprozeß. Die Festmistbereitung unterscheidet sich von dem zuvor Dargestellten durch die zusätzliche flüssige Komponente (Harn) im Gemenge. Dabei besteht aber zur Aufnahme der Flüssigkeit während des Aufenthaltes des Mistes im Stall bzw. auf der Dungplatte genügend Zeit und die überschüssige Flüssigkeit kann abfließen. Durch die Struktur des Strohes sind hohe Wassergehalte im Gemenge möglich (50–85 %), wobei hohe Luftvolumenanteile entstehen (50–65 %).

Beispiel 6: Statt Stroh, wie im Beispiel 5, können für die Kompostierung pastöser Schlämme auch Hackschnitzel verwendet werden. Den Hackschnitzeln kommt dabei fast ausschließlich eine Stützfunktion im Haufwerk zu, da sie wegen des hohen Ligningehaltes selbst nur sehr langsam abgebaut werden können. Aus diesem Grunde ist es möglich, einen Teil der Hackschnitzel nach dem Rotteprozeß auszusieben und im Prozeß erneut zu verwenden.

3.2 Einfluß des Feuchtegehaltes des Gemenges

Entsprechend der Modellvorstellung eines Drei-Phasen-Systems nimmt der Anteil an Luftporen am Gesamtvolumen einer Schüttung mit zunehmendem Wassergehalt ab. Diese Abhängigkeiten sind im Bild 4 für Gemenge aus Flüssigmist und gehäckseltem Stroh (mittlere Halmlänge 2 mm) bzw. Rückgut aus getrocknetem und gemahlenem Kompost (mittlere Partikelgröße 0,6 mm) dargestellt. Die Gemenge aus Rückgut und Flüssigmist liegen in unterschiedlicher Struktur vor. Zum einen sind sie krümelig (Kurve K) und zum anderen verpreßt zu Hohlpreßlingen (Außendurchmesser 50 mm, Lochdurchmesser 15 mm, mittlere Länge 10 cm – Kurve P).

Bis zu einem Feuchtegehalt von etwa 50 % verändert sich das hohe Luftporenvolumen beim Stroh-Flüssigmist-Gemenge nur geringfügig, da das Stroh das Wasser vollständig aufsaugt. Mit weiter ansteigendem Wassergehalt treten zwei Effekte auf. Das Stroh verliert seine Sprödigkeit und wird zunehmend elastischer, was zur Volumenverminderung des Haufwerkes und damit zur Verringerung des Luftporenvolumens führt. Außerdem werden die Luftporen zunehmend mit Wasser gefüllt. Der für diese Gemenge optimale Feuchtegehalt U_G für die Kompostierung liegt in einer 1 m hohen Schüttung zwischen etwa 65 und 75 %, entsprechend einem Luftvolumenanteil von etwa 60–80 %. Der untere Feuchtegehalt U_G ist durch Wassermangel für die bei der Rotte aktiven Bakterien bestimmt. Bei geringeren Schütthöhen kann der Feuchtegehalt des

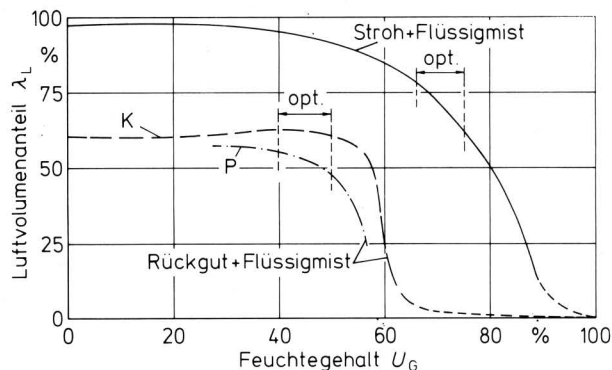


Bild 4. Luftvolumenanteil λ_L von Gemengen aus Stroh und Flüssigmist bzw. Rückgut und Flüssigmist in Krümel-(K) und Preßlingform (P) in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt des Gemenges U_G ; opt. = optimaler Feuchtegehalt für die Kompostierung.

Gemenges ohne Gefahr weitreichender anaerober Umsetzungsvorgänge auf 80 % erhöht werden.

In Gemengen aus Rückgut und Flüssigmist (Kurven K und P) ist der Luftvolumenanteil im Gemenge deutlich niedriger als bei Stroh-Flüssigmist-Gemengen, was auf den niedrigeren Luftvolumenanteil des Trockenstoffs zurückzuführen ist. Bei den krümeligen Gemengen (K) kann ab Feuchtegehalten U_G von etwa 30 % bis zu etwa 43 % ein leichter Anstieg des Luftporenvolumens beobachtet werden. Dieser Anstieg ist, begünstigt durch den hohen Anteil kolloidaler Bestandteile im Flüssigmist, durch den Aufbau von krümeligen Aggregaten zu erklären, die mehrere cm Durchmesser haben können. Ab Feuchtegehalten von etwa 55 % fällt der Luftvolumenanteil im Gemenge von fast 60 % sehr steil ab und beträgt bei einem Feuchtegehalt von 60 % nur noch 25 %. Haufwerke aus Preßlingen (P) haben bei gleicher Zusammensetzung einen Luftvolumenanteil, der etwa 10 % niedriger liegt als der vergleichbarer Krümel-Haufwerke.

Der optimale Feuchtegehalt U_G für die Kompostierung von Rückgut-Flüssigmist-Gemengen liegt zwischen 40 und 50 %, wobei der untere Wert durch Wassermangel für die mikrobiellen Umsetzungsprozesse bestimmt wird und der obere Wert durch einen Mangel an luftführenden Poren bzw. durch die verminderte mechanische Stabilität der Preßlinge. Der Vorteil von Preßlingen für die Kompostierung im Vergleich zu Krümeln ist in der besseren Luftdurchlässigkeit der Haufwerke begründet, der vor allem bei Schütthöhen über 1,5 m von Bedeutung und Interesse ist. Wie im Bild 5 dargestellt, ist der Strömungswiderstand, dargestellt als bezogener Druckverlust Δp , bei Krümeln etwa um den Faktor 100 größer als bei Preßlingen.

3.3 Einfluß der Druckbelastung

Durch das Eigengewicht des rottenden Gutes ergeben sich innerhalb des Haufwerkes unterschiedliche Luftvolumenanteile und damit unterschiedliche Lebensbedingungen für die Mikroorganismen. Die Verringerung des Luftvolumenanteils hängt neben dem Wassergehalt des Gemenges von der Druckbelastung p ab, der eine bestimmte Schütthöhe h entspricht. Das Bild 6 zeigt die Unterschiede in der Haufwerkstruktur von Gemengen aus separiertem Feststoff aus Rinderflüssigmist und gehäckseltem Stroh (mittlere Länge 2 mm) mit unterschiedlichen Feuchtegehalten bei gleichen Druckbelastungen p in einer 0,2 m hohen Schüttung. Die Abnahme des Luftvolumenanteils bei zunehmendem Druck ist bei den dargestellten Gemengen in etwa gleich, wobei aber mit steigendem Feuchtegehalt des Gemenges die prozentuale Abnahme ansteigt. Lediglich beim Gemenge mit dem hohen Feuchtegehalt U_G von 86 % und einer Druckbelastung von $0,8 \text{ N/cm}^2$, entsprechend einer Schütthöhe von 1,6 m, tritt Flüssigkeit aus, so daß sich das Luftporenvolumen vergrößert. Wird ein Mindest-Luftvolumenan-

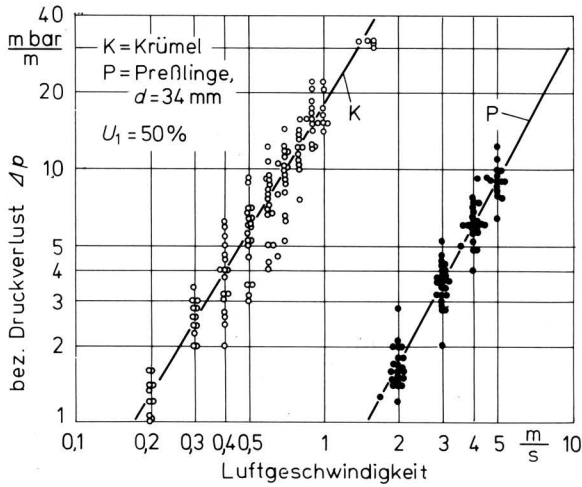


Bild 5. Auf 1 m Schütthöhe bezogener Druckverlust Δp von Krümeln bzw. Preßlingen aus Rückgut und Flüssigmist in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit.

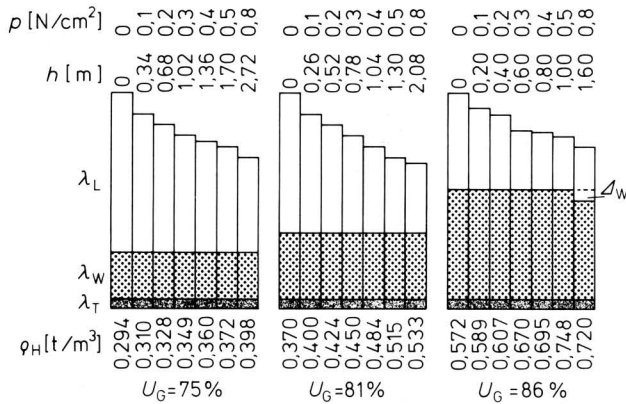


Bild 6. Veränderungen der Haufwerkstruktur von Gemengen mit unterschiedlichen Feuchtegehalten U_G aus gehäckseltem Stroh und separierten Feststoffen aus Flüssigmist bei steigender Druckbelastung p (entsprechend einer Schütthöhe h); ρ_H = Schüttdichte des Gemenges; Δ_W = Wasserverlust.

teil von 50 % für eine optimale Kompostierung zugrunde gelegt, so sollte bei einem Feuchtegehalt des Gemenges von 75 % eine Schütthöhe von 1,5 m nicht überschritten werden, bei 81 % etwa 0,5 m. Bei 86 % Feuchtegehalt ist eine Kompostierung mit ausreichender Sauerstoffversorgung wegen des geringen Luftvolumenanteils nicht möglich. Das heißt aber nicht, daß in den Randzonen derartiger Schüttungen keine Kompostierungsprozesse einsetzen können.

3.4 Einfluß der Rottezeit

Der Luftvolumenanteil einer Schüttung unterliegt während des Kompostierungsprozesses Veränderungen, die mehrere Ursachen haben können. Er steigt an durch Verringerung des Wassergehaltes im Gemenge durch Verdunstung, begünstigt durch hohe Rottetemperaturen. Dagegen verringern den Luftvolumenanteil Veränderungen des strukturbildenden Trockenstoffs durch Befeuchtung, hohe Temperaturen und mikrobiellen Angriff. In **Bild 7** und **8** sind die Veränderungen des Feuchtegehaltes und des Luftvolumenanteils zweier unterschiedlicher Gemenge während einer siebenwöchigen Rotte mit wöchentlichem Umsetz- und Mischintervall dargestellt.

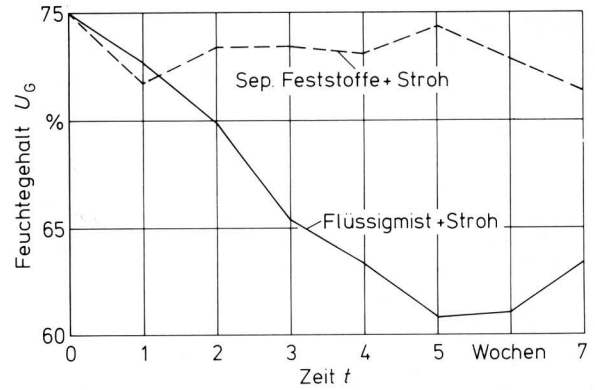


Bild 7. Feuchtegehalt U_G von Gemengen aus Stroh und Flüssigmist bzw. separierten Feststoffen aus Flüssigmist während der Rottezeit bei einwöchigem Umsetzintervall.

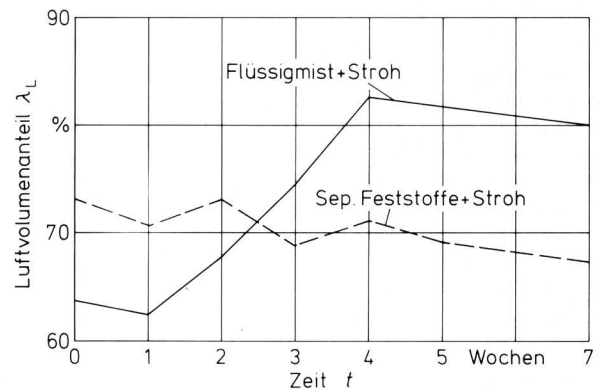


Bild 8. Luftvolumenanteil λ_L von Gemengen aus Stroh und Flüssigmist bzw. separierten Feststoffen aus Flüssigmist während der Rottezeit bei einwöchigem Umsetzintervall.

Bei den Gemengen handelt es sich zum einen um Rinderflüssigmist (Trockensubstanzgehalt $Z = 10\%$), zum anderen um separierten Feststoff aus Rinderflüssigmist ($Z = 18\%$), jeweils vermengt mit gehäckseltem Stroh. Die Gemenge unterscheiden sich in den Anteilen an Stroh und damit in der Größenverteilung der Feststoffpartikel. Im Flüssigmist-Stroh-Gemenge ist der Anteil der langen Strohpartikel im Vergleich zu den vergleichsweise kurzen Partikeln aus dem Flüssigmist deutlich höher als in dem Feststoff-Stroh-Gemenge, in dem ein relativ hoher Anteil kurzer Partikel aus dem separierten Feststoff enthalten ist.

Die genannten Unterschiede haben unmittelbare Auswirkungen auf die Veränderungen des Luftvolumenanteils und des Feuchtegehaltes U_G . Ausgehend vom gleichen Feuchtegehalt von 75 % zu Beginn der Rotte nimmt der Feuchtegehalt in den Flüssigmist-Stroh-Gemengen während der ersten fünf Wochen der Rotte auf etwa 60 % ab, während der Feuchtegehalt im Feststoff-Stroh-Gemenge während der gesamten Beobachtungszeit sich nur wenig verringert. Diese Veränderungen zeigen sich in entsprechender Weise beim Luftvolumenanteil, der bei den Flüssigmist-Stroh-Gemengen mit sinkendem Feuchtegehalt von etwa 62 auf über 81 % ansteigt, während er bei Feststoff-Stroh-Gemengen von anfangs 71 auf unter 69 % abfällt. Beim Selbsterhitzungsverhalten konnten zwischen beiden Gemengen keine Unterschiede festgestellt werden.

4. Zusammenfassung

Voraussetzung für eine schnelle Kompostierung organischer Reststoffe ist die optimale Versorgung der am Abbauprozess beteiligten aeroben Mikroorganismen mit Wasser, Sauerstoff und Nährstoffen. Während die Nährstoffe in den meisten landwirtschaftlichen und kommunalen Abfallstoffen in ausreichender Menge und Zusammensetzung vorhanden sind, ist häufig das Wasser im Überschuss und Sauerstoff im Mangel. Dies trifft insbesondere für organische Schlämme zu. Solange die Sauerstoffversorgung der Mikroorganismen in der flüssigen Phase sichergestellt ist, gibt es keine Begrenzung des zulässigen Wassergehaltes bei der Kompostierung.

Aufgabe der Verfahrenstechnik bei der Kompostierung ist es im wesentlichen, eine Struktur im organischen Material zu schaffen und zu sichern, die einen Austausch der Respirationsgase ermöglicht. Bei der Kompostierung von organischen Schlämmen kann dies durch Feuchteentzug oder Vermengen mit feuchtesorbierenden und strukturbildenden Stoffen (Stroh, Torf, Sägemehl, Kompost-Rückgut, Trockenschlamm, Hackschnitzel) erreicht werden. Die Art und die mechanische Aufbereitung des Trockenstoffs hängen im wesentlichen von der Konsistenz des zu kompostierenden Schlammes ab. Es werden Beispiele aufgeführt von verschiedenen Schlamm-Trockenstoff-Gemengen.

Anhand der Ergebnisse von Versuchen mit Gemengen aus Stroh und Flüssigmist bzw. separierten Feststoffen aus Flüssigmist sowie Rückgut und Flüssigmist wird der Einfluß des Feuchtegehaltes des Gemenges, der Höhe der Druckbelastung sowie der Einfluß der Rotzeit auf das Luftporenvolumen und das Selbsterhitzungsverhalten dargestellt. Je nach Art des Schlammes und Trockenstoffs ergeben sich unterschiedliche Feuchtegehalte, die für die Kompostierung optimal sind. Das Luftporenvolumen sollte dabei nicht unter 50 % sinken.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] • *Glathe, H. u. G. Farkasdi*: Biologie und Hygiene der Kompostierung.
In: *Straub, H., G. Hösel u. W. Schenkel* (Hrsg.): Müll- und Abfallbeseitigung (Müll-Handbuch) Bd. 4.
Berlin: Erich Schmidt 1964.
- [2] *Gray, K.R., K. Sherman u. A.J. Biddlestone*: A review of composting – part 1.
Process Biochemistry Bd. 6 (1971) S. 32/36.
- [3] *Haug, R.T.*: Compost Engineering.
Ann Arbor Science 1980.
- [4] • *Pöpel, F. u.a.*: Die Beseitigung von Abfallstoffen durch Kompostierung.
In: *Straub, H., G. Hösel u. W. Schenkel* (Hrsg.): Müll- und Abfallbeseitigung (Müll-Handbuch) Bd. 4.
Berlin: Erich Schmidt 1964.
- [5] *Schuchardt, F.*: Einfluß der Haufwerkstruktur auf den Kompostierungsverlauf, dargestellt am Beispiel von Flüssigmist-Feststoff-Gemengen.
Grundl. Landtechnik Bd. 28 (1978) Nr. 2, S. 69/75.
- [6] *Schuchardt, F.*: Einfluß des ökologischen Faktors "Struktur" auf die Kompostierung von Flüssigmist-Feststoff-Gemengen.
Diss. TU Berlin 1977; Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 38 (1977).
- [7] *Loll, U.*: Einfluß der Behandlungstemperatur auf Sauerstoffzufuhr, Abbau und Stabilisierung bei der Flüssigfermentation.
Grundl. Landtechnik Bd. 28 (1978) Nr. 2, S. 60/64.
- [8] • *Baader, W., D. Bardtke, K. Grabbe u. C. Tietjen*: Behandlung tierischer Exkrementen.
In: *Strauch, D., W. Baader u. C. Tietjen* (Hrsg.): Abfälle aus der Tierhaltung.
Stuttgart: Ulmer 1977.
- [9] *Böhme, L.*: Fragen der Kompostierung von nicht ausgefaultem Klärschlamm.
Diss. Berlin 1961.
- [10] *Böhme, L.*: Verhinderung von anaeroben Zonen in Kompostmieten durch StAM.
Informationsblatt der IAM Nr. 25 (1965) S. 19/26.
- [11] *Böhme, L.*: Die Kompostierung von nicht ausgefaultem Klärschlamm.
Informationsblatt der IAM Nr. 27 (1965) S. 52/62.
- [12] *Imhoff, K. u. E. Müller*: Die Heißvergärung von stichfestem Schlamm.
Gesundheits-Ingenieur Bd. 63 (1938) S. 160/63.
- [13] *Sierp u. Buchsteeg*: Abbauvorgänge bei der Trocknung und Heißvergärung von häuslichem Abwasserschamm.
Techn. Gem.bl. (1942) S. 203/11.
- [14] *Schreiber, B. u. W. Ballnus*: Erfahrungen mit Schreiber-Schlamm-trocknungs- und Kompostierungsanlagen.
Kommunalwirtschaft (1970) H. 9, S. 338/42.
- [15] *Schuchardt, F.*: Unveröffentlichte Versuchsergebnisse.
- [16] *Wells, D.M., R.C. Albin, W. Grub u. R.Z. Wheaton*: Aerobic decomposition of solid wastes from cattle feedlots.
Texas Technological College, Water Resources Center, Lubbock, Texas, WRC-69-2, 1969.
- [17] *Baader, W.*: Verfahren zur Herstellung eines Düngemittels aus tierischen Exkrementen.
Patentschrift DE 2705089 C2 vom 19.9.1985.
Schweiz: Nr. 636.069 vom 13.5.1983
Großbritannien: Nr. 1.600.429 vom 14.10.1981
USA: Nr. 4.498.855 vom 12.2.1985
Japan: Nr. 1.324.215 vom 27.6.1986.
- [18] *Schuchardt, F. u. W. Baader*: Kompostierung von brikettiertem Klärschlamm.
Müll und Abfall Bd. 11 (1979) H. 8, S. 205/14.
- [19] *Schuchardt, F., H. Sonnenberg u. W. Baader*: Ein Verfahren zur Kompostierung von Klärschlamm ohne Zuschlagstoffe.
Referatssammlung zum 3. abfallwirtschaftlichen Fachkolloquium, 28. und 29.4.1983 Saarbrücken; Hrsg.: Kommunaler Abfallbeseitigungsverband Saar.
- [20] *Schuchardt, F. u. H. Sonnenberg*: Erstellung und Erprobung einer Pilotanlage zur Kompostierung von vorentwässertem zu Preßlingen verformtem Klärschlamm ohne Verwendung von fremden Zuschlagstoffen.
Versuchsbericht Institut für Technologie (unveröffentlicht), Juli 1983, 21 S.
- [21] *Spoehn, E.*: Recent developments in composting of municipal wastes in Germany.
Compost Science Bd. 18 (1977), March–April, S. 25/32.
- [22] *Spoehn, E.*: Verfahren zur aeroben Verrottung von Abfällen in Form von Pellets.
Offenlegungsschrift 2458438 vom 16.6.1976.
- [23] *Baader, W., F. Schuchardt u. H.H. Theune*: Aufbereitung von Hühnerkot zur Gewinnung umweltverträglicher Dünger und schadloser Futterzusätze.
Abschlußbericht BML-BA 136, Institut für Landmaschinenforschung der FAL, Braunschweig 1977, 113 S.
- [24] *Baader, W., F. Schuchardt u. H. Sonnenberg*: Untersuchungen zur Entwicklung eines technischen Verfahrens für die Gewinnung von Feststoffen aus tierischen Exkrementen.
1. Mitt.: Grundl. Landtechnik Bd. 25 (1975) Nr. 2, S. 33/42.
2. Mitt.: Grundl. Landtechnik Bd. 26 (1976) Nr. 6, S. 234/44.
3. Mitt.: Grundl. Landtechnik Bd. 27 (1977) Nr. 6, S. 184/90.
- [25] *Baader, W., F. Schuchardt u. H. Sonnenberg*: Transformation of liquid manure into a solid.
Agricultural Wastes Bd. 1 (1979) H. 3, S. 167/90.
- [26] *Galler, W.S. u. C.B. Davey*: High rate poultry manure composting with sawdust.
Livestock waste management (1971) S. 159/62.
- [27] *Blanken, G.*: Bereitung von Kompostdünger aus Hühnerkot.
Deutsche Geflügelwirtschaft Bd. 26 (1967) S. 496.

- [28] *Baumann, E. u. J. Reinhold*: Die Aufbereitung fester Fäkalstoffe aus der Tierproduktion zu organischen Düngestoffen für die Gemüseproduktion. Wasserwirtschaft, Wassertechnik Bd. 22 (1972) S. 199/201.
- [29] *Wörle, R.*: Ergebnisse der Untersuchungen über Betriebstechnik, Betriebssicherheit, Technologie und Wirtschaftlichkeit am Bioreaktor zur Abwasserschlammentwertung. Müll und Abfall Bd. 10 (1978) H. 1, S. 12/19.
- [30] *Schwanhäuser, H.*: Erfahrungen mit dem Schlammverrotungssystem Dambach-Schnorr in Rastatt. Müll und Abfall Bd. 10 (1978) H. 1, S. 20/25.
- [31] *Shell, G.L. u. J.L. Boyd*: Composting of dewatered sewage sludge. Compost Science Bd. 11 (1970) Nr. 3, S. 17/21.
- [32] *Spennes, G. u. Th. Britsch*: Klärschlammkompostierung ohne Zusätze. Kommunalwirtschaft Bd. 9 (1977) S. 321/25.
- [33] *Spennes, G. u. Th. Britsch*: Kompost aus Klärschlamm. VDI-Nachrichten Nr. 45 vom 11. November 1977.
- [34] *Mach, R.*: Anlagen und Systeme zur Kompostierung von Abwasserschlämmen in der Bundesrepublik Deutschland – Stand sowie Tendenzen. Müll und Abfall Bd. 10 (1978) H. 1, S. 1/9.
- [35] *Widmer, P. u. H.G. Konstandt*: Ein neues Schnellrotte-Verfahren als Beitrag zur weitgehenden Klärschlamm-Verwertung. Gas-Wasser-Abwasser Bd. 57 (1977) Nr. 3, S. 297/303.
- [36] *Hong, J.H., J. Matsuda u. Y. Ikeuchi*: High rapid composting of dairy cattle manure with crop and forest residues. Trans. ASAE Bd. 26 (1983) Nr. 2, S. 533/41.
- [37] *Hummel, J.W. u. G.B. Willson*: High-rate mechanized composting of dairy manure. Proc. Intern. Symp. on Livestock Wastes, 1975, Urbana, Champaign, Ill.
- [38] *Dencker, C.H.*: Häckselhof und Häckselmist. Sonderdruck aus der Vortragsreihe der 4. Hochschultagung der Landw. Fakultät Bonn-Poppelsdorf vom 11.–13. Sept. 1950.
- [39] *Baader, W., F. Schuchardt, H. Sonnenberg u. H. Söchtig*: Die Gewinnung eines lagerfähigen und landwirtschaftlich nutzbaren Feststoffes aus Rinderflüssigmist. Ber. Landw. Sonderh. 192 (1975) S. 798/835.
- [40] *Schuchardt, F.*: Ein Verfahren zur Kompostierung von Schweine-Flüssigmist unter Zusatz von Stroh und Perlit. Landbauforschung Völkenrode Bd. 35 (1985) H. 1, S. 11/19.
- [41] *Schuchardt, F.*: Composting of liquid manure and straw. Proceedings 4th Intern. Symp. of CIEC, Braunschweig 1987, im Druck.
- [42] *Klausning, O., H. Knipping u. H. Noltze*: Bio-Mist aus Schlamm und Stroh. Umwelt Bd. 5 (1974) S. 29/30.
- [43] *Stombaugh, D.P. u. R.K. White*: Aerobic composting – New built-up bed technique. Proc. Intern. Symp. on Livestock Wastes, 1975, Urbana, Champaign, Ill.
- [44] *Köhnlein, J. u. H. Vetter*: Die Stalldüngerrotte bei steigender Strohstreue. Z. f. Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde Bd. 63 (1953) S. 119/41.
- [45] *Goldstein, N.*: "Odor-free" sludge in a high density suburb. Bio Cycle Bd. 24 (1983) Sept./Oct., S. 24/27.
- [46] *Willson, G.B. et al.*: Manual for composting sewage sludge by the Beltsville aerated-pile method. U.S. Environmental Protection Agency; EPA-600/8-80-022, May 1980.



VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1987
Schriftleitung: Dr. F. Schoedder, Braunschweig

Printed in Germany. Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil dieser Schriftenreihe darf in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikrokopie oder ein anderes Verfahren – ohne schriftliche Genehmigung des Verlages, auch nicht auszugsweise, reproduziert werden. – All rights reserved (including those of translation into foreign languages). No part of this issue may be reproduced in any print, microfilm, or any other means, without written permission from the publishers. – Herstellung: Druckerei Ruth, Braunschweig.