

notwendige Temperaturniveau (ca. 800 °C [2]) in dem über dem Brennstoff befindlichen Brennkammerraum möglichst schnell erreicht werden, indem diesem Raum keine Wärme entzogen und evtl. dieser sogar durch einen Stützbrenner zusätzlich aufgeheizt wird. Es bleibt dann noch eine ungleichmäßige Wärmefreisetzung als Funktion der Brennzeit. Diese ist über eine Regelung des Verbrennungsluftdurchsatzes nur bedingt auszugleichen. Die Regelung geschieht bei der normalen Ofenheizung über Thermostaten im Heißwasserkreislauf, welche bei Ansteigen der Temperatur die Zuluft drosseln und umgekehrt. Wendet man dieses Prinzip hier an, so ist zu ersehen, daß die erste Phase der Verbrennung einen schnellen Anstieg der Wassertemperatur bewirken wird und als Folge dessen eine Drosselung der Zuluft, ohne daß hierdurch die Freisetzung reaktionsfähiger Gase infolge des im Brennraum vorhandenen Temperaturniveaus unterbunden werden kann. Diese Art der Regelung wäre somit bei diesem Verbrennungsprinzip nur anzuwenden, wenn die Ungleichmäßigkeiten im Verbrennungsablauf durch häufiges, im Extremfall kontinuierliches Beschicken ausgeglichen werden.

Aus den Ergebnissen der Versuche und den eben genannten Überlegungen ist zu folgern, daß eine Verbrennung nach dem Prinzip des unteren bzw. seitlichen Abbrandes insbesondere bei gering verdichtetem Stroh günstiger sein wird.

Bei diesem Verbrennungsprinzip durchströmt die angesaugte Erstluft nur einen Teil der Brennstofffüllung und bewirkt dort Entgasung und teilweise Verbrennung. Verbrannte und nicht verbrannte Gase strömen dann in die Nachbrennkammer und werden dort,

unter Zufuhr von Zweitluft, vollständig verbrannt. Eine Regelung kann über ein Sauggebläse oder eine Drosselklappe wie üblich erfolgen.

Diese Art der Verbrennungsführung soll bewirken, daß im Gegensatz zum Durchbrandofen nur ein wesentlich geringerer Teil der Brennstoffbeschickung am Reaktionsprozeß beteiligt ist. Durch die Teilung der Luftströme in Erst- und Zweitluft ist außerdem eine Nachverbrennung der in der ersten Stufe nicht vollständig verbrannten Gase nach intensiver Mischung mit der Zweitluft sichergestellt.

Der Abbrand in diesem Ofentyp ist weitgehend gleichmäßig und nach dem oben genannten Prinzip ohne Nachteile regelbar, wie durch weitere Versuche gezeigt werden soll.

Die Verbrennung von Stroh zur Nutzung der dabei freiwerdenden Wärme ist eine Möglichkeit der Strohverwertung. Durch richtige Konstruktion der verwendeten Brennkammern kann gleichzeitig die Belastung der Umwelt durch Schadstoffemissionen auf ein Mindestmaß gesenkt werden.

Schrifttum

- [1] Orth, H.W., H. Peters u. U. Köhler: Stroh als Brennstoff? Landtechnik Bd. 30 (1975) Nr. 6, S. 279/81.
- [2] Rasch, R.: Alles wird wieder zu Staub. Umwelt Bd. 3 (1973) Nr. 1, S. 49/53.

Untersuchungen zur Entwicklung eines technischen Verfahrens zur Gewinnung von Feststoffen aus tierischen Exkrementen-2

Von Wolfgang Baader, Frank Schuchardt und Hans Sonnenberg, Braunschweig-Völkenrode*)

Mitteilung aus dem Institut für Landmaschinenforschung der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode (zweite Mitteilung)

Dk 614.76:631.862

Die ökologisch sinnvollste und ökonomisch zweckmäßigste Verwertung des in der tierischen Produktion anfallenden Flüssigmistes ist dessen Rückführung in den Boden. Um während der Zwischenlagerung und Ausbringung Geruchsemissionen und Wertstoffverluste — als Folge einer unkontrollierten biochemischen Zersetzung organischer Verbindungen — zu vermeiden bzw. zu verringern, sowie eine kostengünstige und hygienische Handhabung sicherzustellen, ist eine besondere Behandlung erforderlich. Zu den Verfahren, mit welchen diese Ziele erreicht werden können, zählt die Kompostierung in Verbindung mit einer Trocknung. In Fortsetzung einer in dieser Zeitschrift bereits erschienenen ersten Mitteilung wird über dieses Verfahren berichtet.

*) Prof. Dr.-Ing. W. Baader ist Direktor des Instituts für Landmaschinenforschung der Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode, Dipl.-Ing. agr. F. Schuchardt und Dipl.-Ing. H. Sonnenberg sind wissenschaftliche Mitarbeiter in diesem Institut.

Inhalt

1. Einleitung
2. Modellversuche
 - 2.1 Biologische Behandlung
 - 2.1.1 Einfluß der Inhaltsstoffe
 - 2.1.2 Einfluß der Struktur der Gemenge-Schüttung
 - 2.1.3 Stickstoffverluste
 - 2.2 Trocknung
 - 2.2.1 Trocknen mit Außenluft
 - 2.2.2 Trocknen mit konditionierter Luft
 - 2.2.3 Energiebedarf
3. Beurteilung der Ergebnisse aus den Modellversuchen
 - 3.1 Biologische Behandlung
 - 3.2 Trocknung
4. Verfahrenslösungen
5. Zusammenfassung
6. Schrifttum

1. Einleitung

Tierische Ausscheidungen können durch Kompostierung in einen hygienischen und landwirtschaftlich verwertbaren Dünger ohne belästigenden Geruch umgewandelt werden. Der mikrobielle Abbau der in den Ausscheidungen enthaltenen organischen Verbindungen läuft jedoch nur dann in der erwünschten Weise ab, wenn ein günstiges Verhältnis von Kohlenstoff (C) zu Stickstoff (N) vorhanden ist, das Substrat genügend Feuchte enthält, um den mikrobiellen Stoffwechsel zu ermöglichen, und eine gleichmäßige, den Bedarf der Mikroorganismen deckende Sauerstoffversorgung, verbunden mit einem ständigen Gasaustausch, sichergestellt ist. Im natürlichen Zustand sind die tierischen Ausscheidungen hierfür zu feucht; meistens werden sie zur Verbesserung der hydraulischen Förderung noch zusätzlich verdünnt. Erst durch Feuchteentzug oder Anreichern mit trockenen und schütt- oder rieselfähigen Stoffen lassen sich die Struktur- und Feuchtebedingungen erfüllen, die für eine einwandfreie Kompostierung gestellt werden müssen. Für die Beschaffung, Aufteilung und Zwischenlagerung solcher Zusatzstoffe kann ein erheblicher Kosten- und Organisationsaufwand notwendig werden. Die dieser Arbeit zugrundeliegenden Untersuchungen gehen daher von einem Verfahrensweg aus, bei welchem das zur Feststoffanreicherung erforderliche feinkörnige Trockengut aus dem biologisch behandelten Substrat über thermischen Feuchteentzug und Zerkleinerung gewonnen wird, **Bild 1**.

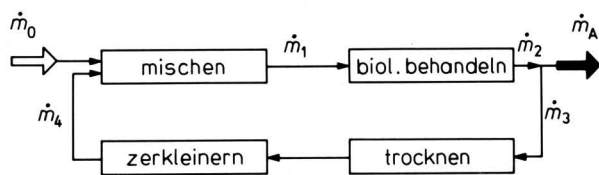


Bild 1. Blockfließbild für ein Verfahren zur Gewinnung von Feststoff aus tierischen Exkrementen.

\dot{m}_0	Ausgangsgut: Flüssigmist, Feuchtegehalt $U_0 < 0,90$
\dot{m}_1	Gemenge: Krümelstruktur, $U_1 = 0,45$ bis $0,55$
\dot{m}_2	Gemenge: Krümelstruktur, $U_2 = 0,43$ bis $0,53$
\dot{m}_3	Rückgut: $U_3 = U_2$
\dot{m}_4	Rückgut: Korngröße $d < 4$ mm, $U_4 < 0,25$
\dot{m}_A	Produkt: $U_A = U_2 < U_1$

In der ersten Mitteilung [1] wurde in einem qualitativen Vergleich dieser Verfahrensweg anderen prinzipiellen Möglichkeiten zur Gewinnung von Feststoff aus Flüssigmist oder ähnlichen organischen Schlämmen gegenübergestellt und über Versuche im Labormaßstab sowie im halbertechnischen Maßstab berichtet. Diese Versuche gaben über die Zuordnung der bei der biologischen Behandlung wirkenden Faktoren Auskunft. Unter Verwendung der durch Selbsterhitzung erreichten Höchsttemperaturen als Maß für die Beurteilung dieser Aktivität konnte insbesondere der Einfluß des Feuchtegehaltes des Flüssigmist-Rückgut-Gemenges quantitativ bestimmt werden. Hieraus ließen sich die Massenströme ableiten, die bei gegebenem Feuchtegehalt des Flüssigmistes jeweils in einzelnen Stufen des Verfahrens bewältigt werden müssen. Diese Daten stellen wichtige Grundlagen für die Bemessung von technischen Anlagen dar.

Es konnte ferner festgestellt werden, daß die erreichbaren hohen Temperaturen bereits nach Einwirkungszeiten von 1 bis 2 Tagen zu einem hygienisch einwandfreien Produkt führen [2 bis 6].

Die bisher durchgeführten Düngungsversuche mit Produkten, die nach diesem Verfahren aus Rinderflüssigmist gewonnen wurden, zeigten positive Ergebnisse [7, 8].

Inzwischen weitergeführte Untersuchungen hatten zum Ziel, die bisher gewonnenen Erkenntnisse durch weitere Versuche abzusichern und insbesondere die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus Laborversuchen auf Verfahrenslösungen im technischen Maßstab zu überprüfen. Besondere Beachtung wurde dabei der Frage des Energiebedarfs und der sicheren Reaktionsführung bei großen Schütthöhen geschenkt.

In dieser zweiten Mitteilung wird im wesentlichen auf die Laborversuche über den biologischen Prozeß und über die Trocknung des Rottegutes sowie auf prinzipielle Möglichkeiten der Umsetzung der Erkenntnisse in technische Lösungen eingegangen. In einer in Kürze folgenden dritten Mitteilung soll dann über die Ergebnisse von Versuchen im technischen Maßstab, über verfahrensspezifische, konstruktive Probleme und über Vorstellungen zu deren Lösungen berichtet werden.

2. Modellversuche

2.1 Biologische Behandlung

Die quantitative Beurteilung der wichtigsten ökologischen Faktoren, die im Feststoffverfahren bei der Kompostierung für eine ungestörte und spontane mikrobielle Aktivität im aeroben Milieu nötig sind, wie Nährstoff-, Sauerstoff- und Feuchteangebot, konnte im Labor erreicht werden [1, 7]. Angaben aus der Literatur waren dabei nur begrenzt verwertbar, da die genannten Faktoren stark von dem Material, das kompostiert werden soll, und dem Verfahren abhängig sind. Die bisher veröffentlichten Ergebnisse aus eigenen Laborversuchen sind im folgenden zusammengefaßt und durch weitere Erkenntnisse über den Einfluß der Haufwerkstruktur und der Schütthöhe auf das Selbsterhitzungsverhalten, den Gasaustausch in einer Säule rottenden Gemenges sowie über Stickstoffverluste ergänzt.

2.1.1 Einfluß der Inhaltsstoffe

Die unterschiedliche Zusammensetzung der tierischen Exkremente aufgrund der verschiedenartigen Futterzusammensetzung und Verdauung bei Rind, Schwein und Huhn schlägt sich im Selbsterhitzungsverhalten nieder. Bei Versuchen mit 15 l-Rottebehältern [1] zeigten Hühnermistgemenge die stärkste Erhitzung (unter optimalen Verhältnissen 74°C in 18 bis 25 Stunden), ähnlich verhielt sich Schweinemist (73°C in 20 Stunden). Gemenge aus Rückgut und Rindermist, der durch die intensive bakterielle Pansenverdauung ärmer an leicht verfügbaren Nährstoffen ist, erhitzen sich auf niedrigere Temperaturen (63°C in 20 Stunden). Im Reaktor der halbtechnischen Anlage lagen die Rottetemperaturen bei allen Tierarten zwischen 70 und 75°C . Durch die größeren Abmessungen und Isolierung der Rottebehälter, das heißt durch den dadurch bewirkten Wärmestau, werden die Temperaturen und Erwärmungszeiten nachhaltig beeinflusst.

Gemenge aus Rückgut und Flüssigmist weisen ein (auf die Trockenmasse bezogenes) Kohlenstoff/Stickstoff (C/N)-Verhältnis von 7 bis 15 auf und liegen damit in einem Bereich, in dem es zur Selbsterhitzung mit Stickstoffverlusten kommt [9]. Veränderungen in der Nährstoffzusammensetzung während einer mehrwöchigen anaeroben Lagerphase – bei der Nährstoffe durch Anaerobier in Bruchstücke gespalten werden, die für Aerobier relativ leichter verwertbar sind [9, 10] – haben keinen nachteiligen Einfluß auf die Selbsterhitzung, scheinen diese eher zu fördern [1].

Die Feuchtegehalte der Gemenge, bei denen die höchsten Selbsterhitzungstemperaturen erreicht werden, konnten in den Laborversuchen bei einer Schütthöhe von $0,26$ m für Rindermist mit $U = 0,40$ bis $0,50$, für Hühnermist mit $U = 0,30$ bis $0,60$ und für Schweinemist mit $U = 0,40$ bis $0,55$ bestimmt werden. Der Anteil der mit Luft gefüllten Poren beträgt dabei für Rindermist $\lambda_L = 0,60$ bis $0,45$, für Hühnermist $\lambda_L = 0,63$ bis $0,45$ des Gesamtvolumens. Die Intensität der Zerkleinerung des Rückgutes hat darauf keinen wesentlichen Einfluß. Mit steigenden Höchsttemperaturen nimmt die Zeit bis zum Erreichen dieser Temperaturen ab. Der Feuchtegehalt des Flüssigmistes, wie er sich zum Beispiel durch Wasserzugabe im Stall verändert und auf die Nährstoffkonzentration im Gemenge auswirkt, ist ohne Bedeutung für die Selbsterhitzungsfähigkeit ebenso wie hohe Temperaturen bei der Trocknung des Rückgutes (3 Tage bei 105°C bzw. 2 Tage bei 170°C).

2.1.2 Einfluß der Struktur der Gemenge-Schüttung

Für den Ablauf der Selbsterhitzung organischer Stoffe in einem Haufwerk ist dessen Struktur von besonderer Bedeutung. Dabei

sei unter Struktur, in Anlehnung an die Definition für Bodengefüge bzw. -struktur [11], die Art der räumlichen Anordnung der festen Gemengebestandteile verstanden. Diese bestimmt die Aufteilung des gesamten Haufwerkvolumens in die Volumenanteile der festen Bestandteile und der Poren, die mit Luft und Wasser gefüllt sind. Die festen Teile bestehen aus Aggregaten, zusammengesetzt aus Rückgut und den Feststoffen des Flüssigmistes. Die Bedeutung der Struktur, insbesondere der luftgefüllten Poren, für die Selbsterhitzung liegt in deren Aufgabe, die Sauerstoff-Versorgung und die Kohlendioxid-Entsorgung der in der flüssigen Phase aktiven aeroben Mikroorganismen sicherzustellen. Der Sauerstoff wird von den Aerobiern zur Oxidation von Kohlenstoffverbindungen benötigt, wobei Kohlendioxid entsteht. Bestimmend für den Gaswechsel sind sowohl der Luftvolumenanteil λ_L als auch die Form der Poren, das heißt deren Durchmesser und Länge, sowie deren Verbindungen untereinander. Dieses Porensystem ist in starkem Maße abhängig vom Druck, wie er durch das Haufwerk selbst ausgeübt wird. Erfahrungen aus der Praxis der Müllkompostierung haben gezeigt, daß in Mieten oder Rottezellen bei zunehmenden Höhen bzw. Feuchtegehalten der natürliche Gasaustausch durch Diffusion sowohl in vertikaler als auch horizontaler Richtung infolge Verringerung des Luftvolumenanteils λ_L nicht mehr gewährleistet ist und aerobe durch anaerobe Verhältnisse abgelöst werden, wobei unangenehm faulig riechende Gase auftreten.

Um eine befriedigende Selbsterhitzung auch bei größeren Schütthöhen zu erreichen, wurde daher die Struktur der Rückgut-Flüssigmist-Gemenge derart beeinflusst, daß auch bei größeren Schütthöhen ein ungehinderter Gasaustausch gesichert ist. Dazu wurde das locker-krümelige Gemenge aus dem Mischer mit einer Schneckenpresse zu Preßlingen mit einem Durchmesser von etwa 34 mm und einer Länge von 30 bis 70 mm verformt. Gemenge beider Zustandsformen (feucht-krümelig, Preßlinge) wurden in 15 l-Isolierbehältern (Höhe: 0,26 m; Durchmesser: 0,29 m) auf ihre grundsätzliche Selbsterhitzungsfähigkeit untersucht.

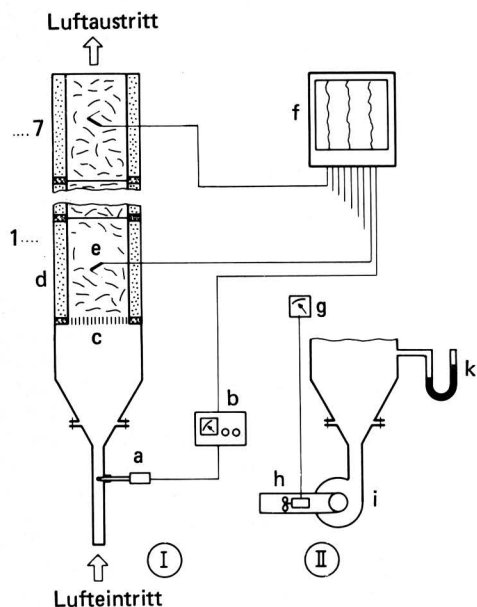


Bild 2. Versuchseinrichtung zur Bestimmung des Selbsterhitzungsverhaltens und des Strömungswiderstandes für Schütthöhen bis zu 3,5 m.

Anordnung I: Selbsterhitzungsverhalten
Anordnung II: Strömungswiderstand

- | | |
|--|---|
| a Hitzdraht-Anemometer | e Thermoelement |
| b Anzeigergerät für Hitzdraht-Anemometer | f Punktdrucker für Temperatur und Luftgeschwindigkeit |
| c Drahtgitterboden; Maschenweite 10 mm | g Anzeigergerät für Flügelrad-Anemometer |
| d Rottebehälter; Höhe: 0,50 m; Durchmesser: 0,31 m; Material: PVC; Isolierung: Styropor, 50 mm stark | h Flügelrad-Anemometer |
| | i Gebläse |
| | k U-Rohr-Manometer |
- 1 7 Anzahl der übereinander gesetzten Segmente

Um zusätzlich den Einfluß der Schütthöhe zu erfahren, wurden die Gemenge in einer wärmeisolierten Säule, Bild 2, (Höhe: variabel von 0,5 bis 3,5 m, in Stufen von 0,5 m, Durchmesser: 0,31 m) zur Selbsterhitzung gebracht. Die selbsttätige Luftzufuhr zu den Gemengen während der Selbsterhitzung (Versuchsanordnung I), die nur über ein Rohr unter den Behältern möglich war, konnte durch Messungen der Luftgeschwindigkeit mit einem Hitzdraht-Anemometer kontinuierlich erfaßt werden. Zur Kennzeichnung der Haufwerkstruktur wurde der Strömungswiderstand unter Zwangsbelüftung bestimmt (Versuchsanordnung II).

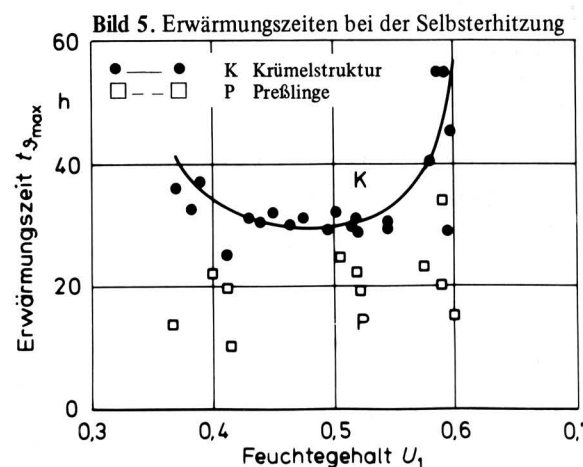
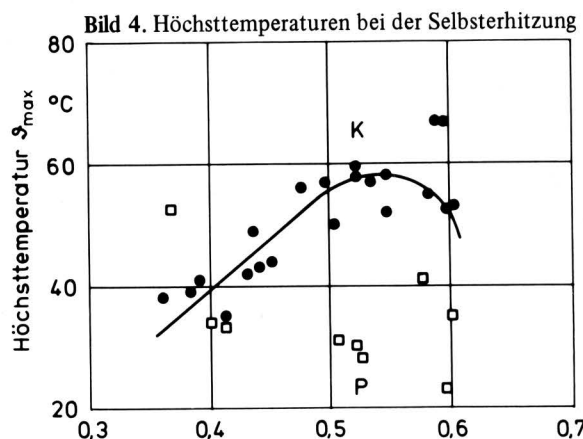
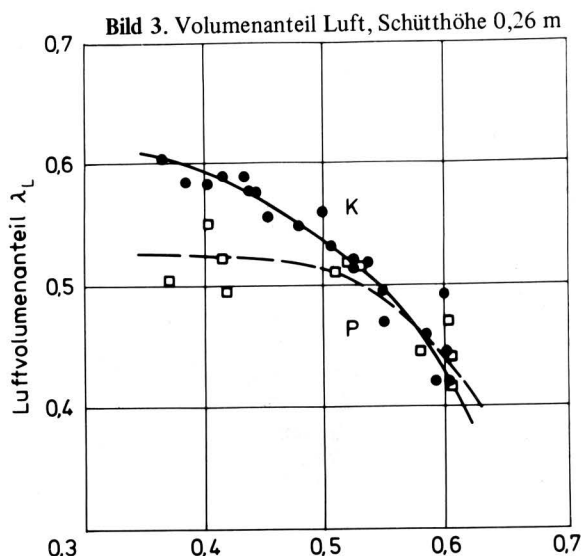


Bild 3 bis 5. Versuche mit Rückgut-Flüssigmist-Gemengen (Rind) verschiedener Feuchte in krümeliger und verpreßter Form in 15 Liter-Behältern.

Ein Vergleich des Selbsterhitzungsverhaltens beider Zustandsformen in den 15 l-Behältern bestätigte Ergebnisse früherer Versuche mit krümeligen Gemengen, nach denen die Höchsttemperaturen vom Feuchtegehalt abhängig sind und das Maximum bei $U = 0,5$ liegt, Bild 4. Die Zeiten bis zum Erreichen der Höchsttemperaturen nehmen wiederum mit zunehmenden Höchsttemperaturen ab, Bild 5. Der Luftvolumenanteil λ_L in den Haufwerken aus Krümeln bzw. Preßlingen, wie in Bild 3 dargestellt, ist bei Feuchtegehalten $U > 0,5$ nahezu gleich; bei $U < 0,5$ ist der Volumenanteil der Luft bei Krümeln etwas größer. Haufwerke aus Preßlingen lassen keine eindeutigen Beziehungen zwischen dem Feuchtegehalt des Gemenges und der Höchsttemperatur erkennen. Allgemein liegen aber die Höchsttemperaturen bei Preßlingen niedriger als bei Krümeln. Entsprechende Versuche mit Hühnermist-Gemengen in den 15 l-Behältern ergaben bei Krümeln und Preßlingen um über 10 °C höhere Temperaturen als bei Rindermist-Gemengen.

Die Versuche in der Säule wurden bisher mit Gemengen aus Rindermist durchgeführt. Der Luftvolumenanteil in der Schüttung nahm bei Krümeln mit zunehmender Schütthöhe ab, z.B. von $\lambda_L = 0,5$ bei 0,5 m auf $\lambda_L = 0,4$ bei 3,5 m. Bei der aus Preßlingen gebildeten Schüttung lag der Luftvolumenanteil um etwa 0,03 darunter, wobei die Preßlinge selbst nur einen Luftvolumenanteil von $\lambda_L = 0,05$ aufwiesen. Die Strömungswiderstände von Krümeln und Preßlingen bei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten, wie sie in Bild 6 dargestellt sind, zeigen die Bedeutung der Aggregatgröße. Danach ist trotz annähernd gleicher Luftvolumenanteile der Strömungswiderstand bei den Preßlingen sehr viel geringer. Die Strömungswiderstände waren bei den in den Versuchen gemessenen, durch den wärmebedingten Auftrieb hervorgerufenen Luftgeschwindigkeiten von maximal $9 \cdot 10^{-3}$ m/s in der Säule, nicht meßbar.

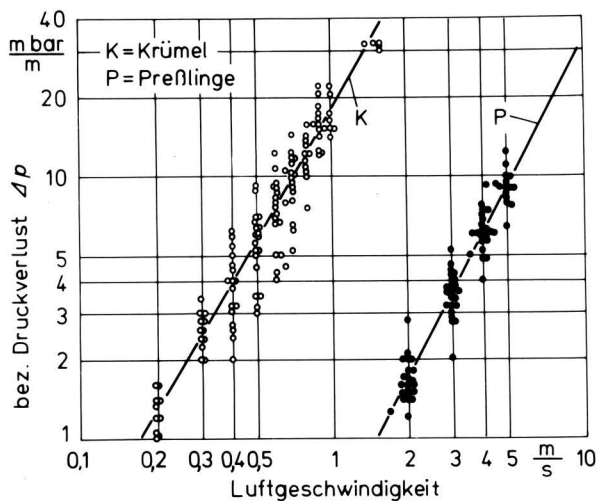


Bild 6. Bezogener Druckverlust in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit.

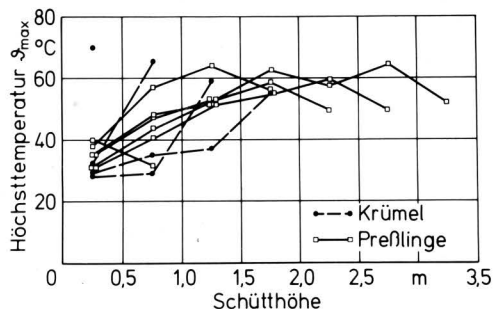


Bild 7. Höchsttemperaturen von Gemengen (Rindermist) in Krümel- und in Preßlingsform in verschiedenen Höhen unterschiedlich hoher Säulen (Temperaturmeßstelle jeweils im Zentrum eines 0,5 m hohen Segments).

Die bei der Selbsterhitzung erreichten Temperaturen sind in Bild 7 dargestellt. Gemenge in krümeliger Form, die sich bei einer Schütthöhe von 0,5 m auf 70 °C erwärmen, erreichen mit zunehmender Schütthöhe niedrigere Höchsttemperaturen. Dabei können sich lediglich die obersten 0,5 m der Säule auf über 50 °C erwärmen, während die Temperaturen aller darunter liegenden Abschnitte nicht einmal 40 °C betragen. Anders verhalten sich Haufwerke aus Preßlingen. Bei 0,5 m Schütthöhe kommt es nur zu einer Erhitzung auf 30 °C; bei zunehmenden Schütthöhen erwärmt sich das Gut bis in 0,5 m Höhe nicht über 40 °C, in allen darüber liegenden Schichten dagegen auf 40 bis 65 °C.

Die Intensität der Selbstbelüftung von Gemengen aus Krümeln und Preßlingen in der Säule bei unterschiedlichen Höhen, ausgedrückt durch den Luftwechsel, d.h. die Häufigkeit des theoretischen Austausches der gesamten im Haufwerk vorhandenen Luft, geht aus Bild 8 hervor. Der Luftwechsel von Preßlingen liegt zwischen 10 und 30, damit deutlich über dem der Krümel und wird von der Schütthöhe scheinbar nicht beeinflusst. Der Luftwechsel der Krümel lag bei den Versuchen so niedrig, daß er kaum erfaßt werden konnte.

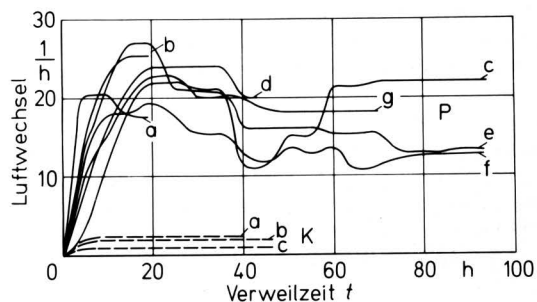


Bild 8. Luftwechsel während der Selbsterhitzung von Gemengen (Rindermist) in Krümel- und Preßlingsform in unterschiedlich hohen Säulen (berechnet aus Analogaufzeichnung der Luftgeschwindigkeit).

— K Krümel
— P Preßlinge
Schütthöhen:
a h = 0,5 m; e h = 2,5 m;
b h = 1,0 m; f h = 3,0 m;
c h = 1,5 m; g h = 3,5 m;
d h = 2,0 m;

Die Selbsterhitzung in der Säule ließe sich wie folgt erklären:

Die für eine Schütthöhe von 0,5 m bei krümeligen Gemengen entstehende Wärme wird gestaut, und es ergibt sich eine Temperatur von 70 °C. Die Ursache für die Erwärmung von Preßlingen auf nur etwa 30 °C bei derselben Schütthöhe ist in deren geringerer Wärmeabfuhr durch höheren Luftwechsel zu sehen. Die Sauerstoffversorgung reicht zwar insgesamt aus — der Luftvolumenanteil bei Preßlingen und Krümeln ist absolut und massebezogen nahezu gleich —, doch ist die Sauerstoffversorgung der Mikroorganismen im Einzelpreßling unzureichend, so daß bei einem Luftvolumenanteil des Preßlings von $\lambda_L = 0,05$ nur an der Oberfläche aerobe, exotherme Vorgänge gesichert sind. Ein faulig-mistiger Geruch von erhitzten aufgebrochenen Preßlingen beweist dies.

Der Luftwechsel bei den Preßlingen reicht während der gesamten Selbsterhitzung aus, um den Sauerstoffbedarf der aeroben Mikroorganismen zu decken. Diese Aussage beruht auf eigenen Untersuchungen zur Höhe des Sauerstoffbedarfs in Abhängigkeit von der Temperatur. Die Haufwerke aus Krümeln werden dagegen nicht ausreichend mit Sauerstoff versorgt.

Es ist zu vermuten, daß sich krümeliges Gemenge über 0,5 m Schütthöhe deshalb nur in der obersten Schicht erwärmt, weil diese von oben mit Luftsauerstoff versorgt wird. In tieferen Schichten reicht das Porensystem zur Luftversorgung nicht mehr aus, denn durch die zunehmende Verdichtung nimmt der Luftvolumenanteil ab, was sich in einer Verengung des Porendurchmessers als auch in

einer Verkürzung der Porenlängen äußert; der gesamte Gasaustausch wird dadurch behindert. Zusätzlich wird im Rottegut durch die aufsteigende Warmluft die Abwärtsbewegung des Kohlendioxids gehemmt bzw. unterbunden.

Der Temperaturverlauf im Reaktor der halbtechnischen Anlage [1] (Schütthöhe 2,0 m; Durchlaufbetrieb), bei dem sich das Gemenge innerhalb eines Tages in der obersten Schicht auf etwa 70 °C erwärmt und in dem die Temperatur auch in den tieferen Schichten nur langsam abnahm, steht nicht im Widerspruch zur oben geäußerten Vermutung. Der Reaktor wurde täglich nur zu einem Viertel (= 0,5 m) von oben neu befüllt. Diese Schicht war ausreichend mit Luft-Sauerstoff versorgt, so daß die genannten Temperaturen erreicht werden konnten. In den darunter liegenden Schichten wurde vermutlich aufgrund von Sauerstoffmangel keine mikrobielle Wärme erzeugt; jedoch waren offensichtlich die Wärmeverluste so gering, daß sich das Gut auch beim Durchwandern der tieferen Zonen verhältnismäßig wenig abkühlte.

Aus dem unterschiedlichen Selbsterhitzungsverhalten von Gemengen in krümeliger und verpreßter Form in den 15 l-Behältern und der Säule wird der Einfluß der Geometrie des Versuchsbehälters (Isolierung und Abstrahlungsfläche im Verhältnis zum Volumen) auf den Wärmestau im Gut deutlich, ebenso wie der Einfluß der Schütthöhe auf den selbsttätigen Gasaustausch.

2.1.3 Stickstoffverluste

Die Forderungen, bei der Behandlung tierischer Exkremente neben der Beseitigung unangenehmer Gerüche und der Hygienisierung auch den Stickstoffgehalt weitgehend zu erhalten, lassen sich nur schwer vereinbaren. Im Rotteprozeß werden durch die Aktivität aerober Mikroorganismen unangenehm empfundene Geruchsstoffe oxidiert und das Entstehen neuer verhindert.

Eine Oxidation ist naturgemäß mit einer Wärmefreisetzung verbunden. Bei der hohen Konzentration an mikrobiell verwertbaren, energiereichen Nährstoffen, wie sie in den Exkrementen im allgemeinen vorliegt, kommt es zur Erhitzung des Substrates, die durch Wärmeisolierung des Behälters unterstützt werden kann. Die Temperaturerhöhung in den Exkrementen kann neben einer Veränderung der Mikrobenarten und einer Verstärkung des Abbaues mit einem in eigenen Untersuchungen festgestellten Maximum bei etwa 50 bis 55 °C zur thermalen Hygienisierung führen [9].

Diese ist umso eher gewährleistet, je höher die Temperatur ist. Eine Temperaturerhöhung führt andererseits dazu, daß Ammoniak aus dem Substrat ausgetrieben wird, wodurch unangenehme Gerüche entstehen. Während z.B. in einem Kilogramm Wasser bei 20 °C etwa 500 g NH_3 lösbar sind, beträgt dieser Wert bei 70 °C nur noch etwa 150 g NH_3 [12]. Weitere ungünstige Einflüsse auf die Freisetzung von Ammoniak sind:

- ein hoher pH-Wert im Substrat, der zu einem hohen Anteil ungeladener NH_3 -Moleküle führt (nach der Dissoziationskonstanten für Ammoniak); der pH-Wert lag bei den Versuchen zwischen 8,5 und 10,0,
- die Harnstoffspaltung durch Urease, bei der Ammoniak freigesetzt wird und
- das Ausbleiben einer Nitrifikantenflora, deren optimaler Temperaturbereich von 30–35 °C nicht gehalten werden kann.

In Versuchen in den 15 l-Behältern wurden die Einflüsse von Temperatur und Verweilzeit auf die Höhe der Stickstoffverluste untersucht. Dazu wurden gleichzeitig acht Behälter mit dem gleichen Ausgangsgemenge (Rindermist) zur Selbsterhitzung gebracht. Bei Erreichen einer Temperatur von 35 °C und darüber hinaus in Abständen von 5 °C, wurde jeweils ein Behälter aus dem Versuch herausgenommen und eine Analysenprobe gezogen. Es ergab sich ein starker Anstieg der Verluste mit Zunahme der Temperatur, Bild 9. Während der Verlust zum Beispiel bei einer Temperatur von 45 °C, die nach 17 Stunden erreicht war, nur etwa 10 % betrug, stieg er 10 Stunden später bei 65 °C auf über 30 % an. Aus dem überproportionalen Anstieg der Verluste im Vergleich zur Erwärmungszeit könnte geschlossen werden, daß der Faktor Tempe-

ratur für die Endverluste von wesentlich größerer Bedeutung ist als der Faktor Zeit, bzw. daß das Austreten von Ammoniak in diesem Prozeß ein rasch verlaufender Vorgang ist.

Neben der Guttemperatur und der Verweilzeit ist der Feuchtegehalt des Ausgangsgemenges von Bedeutung für die Verluste. Um diese Frage zu untersuchen, wurden unterschiedlich feuchte Gemenge aus Hühnermist in den 15 l-Behältern zur Selbsterhitzung gebracht und nach einer Verweilzeit von 140 Stunden analysiert. Die Maximaltemperaturen waren, je nach Feuchtegehalt, nach 15 bis 65 Stunden erreicht. Stickstoffverluste nahmen mit Abnahme des Feuchtegehaltes stärker ab, als es der Verringerung der Maximaltemperatur entsprochen hätte, Bild 10. Es kann daher angenommen werden, daß bei niedrigen Feuchtegehalten des Gemenges, die noch eine Erhitzung bis in den Bereich thermophiler Mikroorganismen ermöglichen, die Stickstoffverluste vergleichsweise niedriger sind.

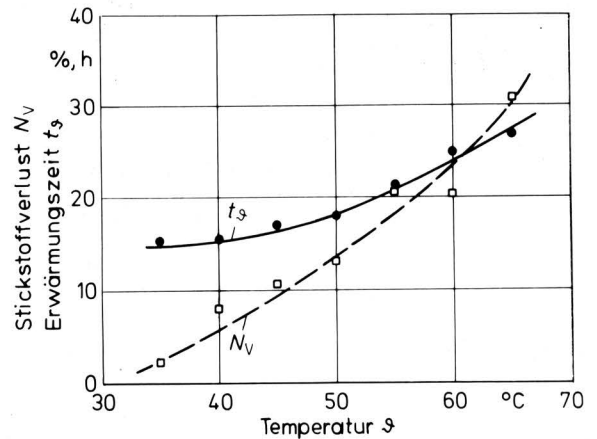


Bild 9. Stickstoffverlust N_V und Erwärmungszeit t_g in Abhängigkeit von der erreichten Temperatur bei Rindermist-Gemengen, $U_1 = 0,5$.

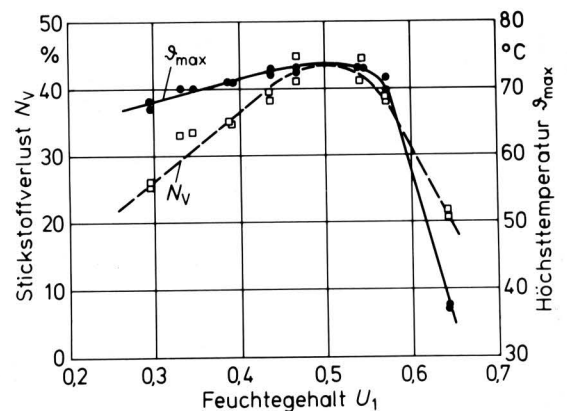


Bild 10. Stickstoffverlust und erreichte höchste Guttemperatur in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt U_1 bei Hühnermist-Gemengen.

2.2 Trocknung

Der im Feststoffverfahren [1] zum Aufmischen benötigte Trocknenstoff muß aus den biologisch behandelten und zu zylindrischen Aggregaten verpreßten Flüssigmist-Rückgut-Gemengen während einer vorgegebenen bzw. vorherbestimmbaren Zeitspanne durch Trocknen von dem Anfangsfeuchtegehalt $U_3 \approx 0,50$ auf einen Restfeuchtegehalt $U_4 = 0,15$ bis $0,25$ gewonnen werden.

Der Aufwand für das Trocknen wird bestimmt:

- von Seiten des Trocknungsmittels durch die Parameter Lufttemperatur ϑ_L , relative Luftfeuchte φ und Luftdurchsatz \dot{V}_L ;

- von Seiten des Trocknungsgutes durch die Art der Feuchtebindung und des Stofftransportes im Aggregat, die Wärmeeigenschaften, den Brenn- bzw. Schwelppunkt, die Größe, Form und Formstabilität der Aggregate, das Porenvolumen in der Schüttung, die Schütthöhe h und die Schwebebeschwindigkeit;
- von Seiten des Betriebes durch die mögliche Energiebereitstellung, die Handhabung und den erforderlichen Durchsatz.

Aus den in der ersten Mitteilung [1] dargelegten Gründen empfehlen sich für den Feuchteentzug in dem vorgegebenen Intervall Konvektionstrocknungsverfahren. So wurden einige der maßgebenden Parameter in einem Durchströmtrockner einfacher Bauart untersucht.

Bei einer Voruntersuchung des Einflusses des Luftvolumenstromes, die bei einem verhältnismäßig ungünstigen Luftzustand ($\vartheta_L = 25^\circ\text{C}$; $\varphi = 0,80$) an einer 1 kg-Probe biologisch behandelten, aggregierten Rindermistes durchgeführt wurde, reichte ein Luftdurchsatz \dot{V}_L von 800 bis 950 $\text{m}^3/\text{h m}^2$ aus, um den gewünschten Feuchteentzug auf den unteren Restfeuchtegehalt von $U_4 = 0,15$ in einem Zeitraum von drei bis vier Tagen zu gewährleisten [7].

Die Untersuchungen des Trocknungsverlaufs wurden gleichzeitig mit naturgegebener Außenluft, wie sie am Versuchsort vorhanden war, mit einem konstanten Luftdurchsatz $\dot{V}_L = 930 \text{ m}^3/\text{h m}^2$ und mit konditionierter Luft, d.h. mit vorgegebener Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte, mit einem konstanten Luftdurchsatz $\dot{V}_L = 800 \text{ m}^3/\text{h m}^2$ durchgeführt.

2.2.1 Trocknen mit Außenluft

Um Auskunft darüber zu erhalten, inwieweit der gewünschte Feuchteentzug mit nicht zusätzlich erwärmter Außenluft, d.h. mit witterungsabhängigen und sich jahreszeitlich verändernden Bedingungen erreicht werden kann, wurden mit Hilfe der Einrichtung gemäß Bild 11 über zwei Jahre lang Trocknungsversuche mit biologisch behandeltem, aggregiertem Rinderflüssigmist durchgeführt. Die jeweilige Temperatur ϑ_L und relative Feuchte φ der Trocknungsluft wurden mittels des Klimaschreibergerätes g registriert, die zeitliche Gewichtsveränderung des Gutes im Probenbehälter c als Maß für die Desorption bzw. Adsorption mittels der Waage f gemessen.

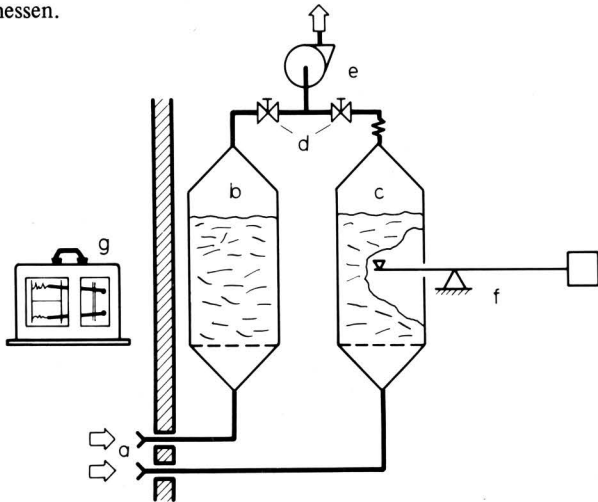


Bild 11. Versuchseinrichtung für die Trocknung mit Außenluft.

- | | |
|---|--|
| a Luftansaugstutzen | d Regulier-Ventil |
| b Probenbehälter für biologische Untersuchungen | e Saug-Gebläse |
| c Probenbehälter für die Trocknung | f Waage |
| | g Schreiber für Temperatur und relative Feuchte der Luft |

Der einzelne Versuch wurde beendet, sobald der Restfeuchtegehalt im Gut einen Tiefstwert angenommen hatte, der sich im Verlaufe einiger Tage nicht weiter verringerte. Die derart aus Versuchen mit Anfangsfeuchtegehalten $0,45 < U_3 < 0,55$ ermittelten

Restfeuchtegehalte, die im jahreszeitlichen Ablauf erzielt werden konnten, sowie die zu diesem Zeitpunkt jeweils herrschenden Luftzustände zeigt Bild 12. Da sich zwischen der Feuchte des Gutes und der Trocknungsluft stets Sorptionsgleichgewicht einzustellen versucht, wird der erreichte Tiefstwert maßgeblich vom Luftzustand während der letzten Trocknungsphase bestimmt. Die Zahl an den Symbolen gibt die Anzahl der Tage an, die bis zum Erreichen dieser Tiefstwerte erforderlich waren. Sämtliche Restfeuchtegehalte der Zeit zwischen April und September überschreiten die angestrebte untere Grenze $U_4 = 0,15$. Bei 91 % aller über den Jahresverlauf verteilten Versuche betrug der Restfeuchtegehalt $U_4 \leq 0,25$, bei 73 % $U_4 \leq 0,20$, und bei 42 % $U_4 \leq 0,15$. In dem überwiegenden Teil des Jahres konnte somit ein genügend niedriger Restfeuchtegehalt erzielt werden.

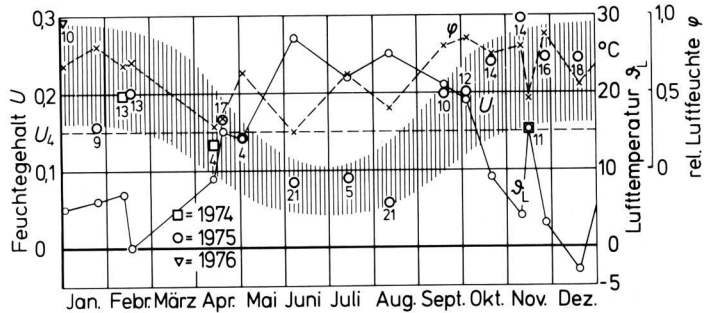


Bild 12. Im Verlauf des Jahres erreichte Restfeuchtegehalte (schraffiert ist der Bereich der Werte, die verschiedenen Symbole stehen für verschiedene Versuchsjahre, die Zahlen an den Symbolen geben die Zahl der Tage an bis zum Erreichen des angegebenen Restfeuchtegehaltes).

Gut: biologisch behandelte, aggregierter Rinderflüssigmist
 Gutmenge: $m = 10 \text{ kg}$
 Schichthöhe: $H = 230 \text{ mm}$
 Luftdurchsatz: $\dot{V}_L = 930 \text{ m}^3/\text{h m}^2$
 Versuchszeitraum: 1974 bis 1976

Die Zeit bis zum Erreichen der angestrebten Restfeuchte wird nach Ablauf der ersten Trocknungsphase im wesentlichen bestimmt von der zufälligen Aufeinanderfolge mehrerer Schönwettertage. Zwischenzeiten bis zu einer solchen Periode bringen keinen Fortschritt. So liegt die Unsicherheit dieses Verfahrens in der schwierigen Vorausbestimmung des zum Erreichen eines bestimmten Gutsfeuchtegehaltes erforderlichen Zeitbedarfs begründet. Er kann kaum genauer als mit drei bis vier Wochen angegeben werden. Zu Zeiten ungünstiger Witterungsbedingungen, während derer das Gut sogar Feuchte aufnehmen kann, sollte die Belüftung ausgeschaltet werden. Dadurch würde die Trocknungszeit verkürzt und Energie für das Belüftungsgebläse eingespart werden. Dieser Schaltungsvorgang könnte durch Kontrolle des Gutes bzw. der maßgeblichen Parameter der Luft bei Ein- und Austritt selbsttätig erfolgen.

2.2.2 Trocknen mit konditionierter Luft

Mit Hilfe eines Klimabereiters durchgeführte Versuche sollten Kenntnis über den Trocknungsverlauf sowie über den Zeit- und Energiebedarf bei konstant gehaltenen Zuständen der Trocknungsluft geben. Die Luft durchströmte einen Modelltrockner, der aus fünf übereinander angeordneten Behältern von je 1 kg Fassungsvermögen besteht [1]. Die Schichthöhe der Probe je Behälter betrug 200 mm. So konnte die Trocknung in einer Gutschicht von 1 m Gesamthöhe simuliert werden. Der Bereich der Trocknungslufttemperaturen erstreckte sich über $\vartheta_L = 20$ bis 45°C , der der relativen Luftfeuchten über $\varphi = 0,20$ bis $0,80$.

Die Gutsproben wurden jeweils bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes zwischen dem Partialdruck der Luft und dem Dampfdruck im Gutsinnern belüftet. Die sich im Gut einstellenden Gleichgewichtsfeuchtegehalte sind die niedrigsten Restfeuchtegehalte, die sich bei den vorgegebenen Zuständen der Trocknungsluft erzielen lassen.

Für die Untersuchungen wurde ein "Standard-Gut" verwendet, das nach dem in Bild 13 gezeigten Schema hergestellt wurde, um über ein Gut mit stets denselben Anfangsbedingungen zu verfügen und damit die Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit der Versuchsreihen zu gewährleisten.

Biologisch behandeltes Gut m_3 aus einem genügend großen Vorrat wird auf den Feuchtegehalt $U > 0$ getrocknet, in einer Labormühle gemahlen, derart mit Wasser gemischt, daß der Feuchtegehalt $U = 0,50$ beträgt und mit einer Laborschneckenpresse zu zylindrischen Aggregaten von 15 mm Durchmesser und unregelmäßigen Längen von 15 bis 40 mm kompaktiert. Die zeitliche Folge der Verfahrensschritte ist stets gleich.

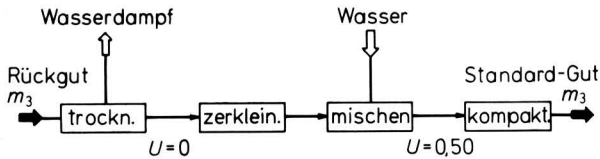


Bild 13. Fließbild für die Herstellung von Standard-Gut.

Vergleichende Untersuchungen des Trocknungsverlaufes von Standard-Gut und ebenfalls kompaktiertem Rückgut m_3 , s. Bild 1, wiesen keine beachtenswerten Unterschiede auf.

Da die Schüttung von der Trocknungsluft von unten nach oben durchströmt wird, erreicht die untere Gutsschicht zuerst den Gleichgewichtsfeuchtegehalt. Es wurde zunächst angestrebt, den unteren Grenzwert des Restfeuchtegehaltes $U_4 = 0,15$ zu erreichen. Verfolgt man die Bewegung der Grenze, bis zu der das Gut auf diesen Gutsfeuchtegehalt getrocknet wurde, so kann man den zeitlichen Verlauf der Trocknung als Schichthöhe h_{15} über der bis dahin benötigten Trocknungszeit t_{15} auftragen, Bild 14.

Bei gleicher Trocknungslufttemperatur steigt der Bedarf an Trocknungszeit t_{15} mit der relativen Luftfeuchte φ an. Bei $\varphi = 0,80$ konnte der gewünschte Restfeuchtegehalt nicht mehr erzielt werden.

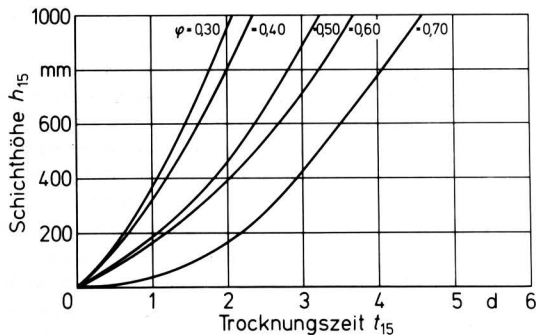


Bild 14. Schichthöhe h_{15} (Dicke der Gutsschicht, in der der angestrebte Feuchtegehalt $U_4 = 0,15$ erreicht wurde) in Abhängigkeit von der Trocknungszeit bei verschiedener rel. Feuchte der Luft.

Standard-Gut
 Höhe der Einzelschicht $H = 200 \text{ mm}$
 Trocknungsluft:
 Temperatur $\vartheta_L = 35 \text{ }^\circ\text{C}$
 rel. Feuchte $\varphi = 0,30 - 0,70$
 Durchsatz $\dot{V}_L = 800 \text{ m}^3/\text{h m}^2$

Trägt man die der Schichthöhe $h_{15} = 1000 \text{ mm}$ entsprechenden Trocknungszeiten für die Lufttemperatur $\vartheta_L = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ nach Bild 14 über der relativen Luftfeuchte φ auf und verfährt in gleicher Weise mit den Werten für die Lufttemperaturen 20, 25 und 45 $^\circ\text{C}$, so kann man in dem Diagramm gemäß Bild 15 den Bedarf an Trocknungszeit $t_{15,1}$ ablesen, der bei gegebenem Luftzustand erforderlich ist, um eine Gutsschicht von 1 m Höhe auf $U_4 = 0,15$ zu trocknen. Der Zeitbedarf steigt mit zunehmender Luftfeuchte progressiv an.

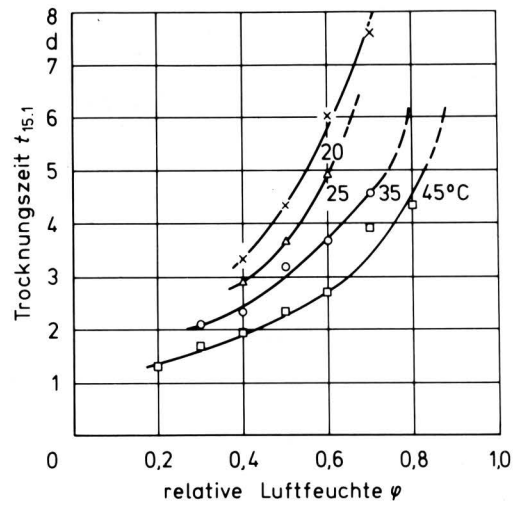


Bild 15. Trocknungszeit $t_{15,1}$ für die Trocknung vom Feuchtegehalt $U_3 = 0,50$ auf $U_4 = 0,15$ bei 1 m Schichthöhe in Abhängigkeit von der relativen Feuchte der Trocknungsluft für verschiedene Trocknungslufttemperaturen.

Standard-Gut
 Luftdurchsatz $\dot{V}_L = 800 \text{ m}^3/\text{h m}^2$

Werden die jeweiligen Gleichgewichtsfeuchtegehalte U umgerechnet auf den Feuchtegrad X des Gutes und über der relativen Luftfeuchte aufgetragen, so ergeben sich Desorptionsisothermen gemäß Bild 16 für verschiedene Trocknungslufttemperaturen. Ein Vergleich dieser Isothermen mit nach einem Standardverfahren für verschiedene Mistarten ermittelten Adsorptions-Desorptions-Isothermen¹⁾ zeigt sehr gute Übereinstimmung. Sie repräsentieren das für ein organisches Gut typische hygroskopische Verhalten mit Adsorption im Bereich niedriger Gleichgewichtsdampfdrücke und Kapillarkondensation im Bereich höherer Werte [13, 14]. Die gestrichelten Kurven entstammen vorausgegangenen Versuchen mit 1 kg-Proben [1].

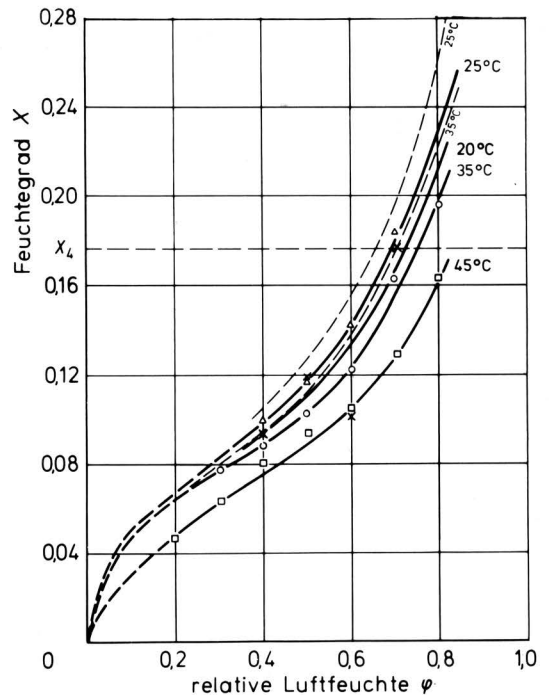


Bild 16. Desorptionsisothermen für verschiedene Trocknungslufttemperaturen.

— Standard-Gut
 - - - - - verschiedener biologisch behandelter Rinderflüssigmist

¹⁾ gemessen in der Bundesforschungsanstalt für Ernährung, Karlsruhe.

2.2.3 Energiebedarf

Beim Trocknen mit Außenluft ist der einzige Energieverbraucher das Gebläse. Wählt man aus den in Bild 12 dargestellten Versuchen diejenigen aus, die die untere Restfeuchtegrenze $U_4 = 0,15$ erreichten bzw. unterschritten und trägt die bis zum Erreichen dieses Feuchtegehaltes verbrauchte Energie über dem Jahresverlauf auf, so ergibt sich in Bild 17 der schraffierte Bereich zu den Meßpunkten mit den offenen Symbolen. Die Zahl über dem Symbol gibt die erforderliche Trocknungszeit t_{15} in Tagen an. E kennzeichnet den Energiebedarf (in MJ und kWh), der benötigt wurde, um die 10 kg-Probe vom Feuchtegehalt $U_3 \approx 0,50$ auf $U_4 = 0,15$ zu trocknen. Hieraus errechnen sich der spezifische Energiebedarf e (je kg Feuchtgut) sowie der spezifische Wärmebedarf q (je kg entzogenen Wassers). Der Energiebedarf für das Trocknen bis auf $U_4 = 0,20$ ist durch die vollen Dreiecke der für $U_4 = 0,25$ durch die vollen Kreise gekennzeichnet. Wie zu erwarten, ergaben sich für die überwiegend trockene Sommerzeit die niedrigsten Werte. Ungünstige Perioden sind das frühe Frühjahr und der Herbst.

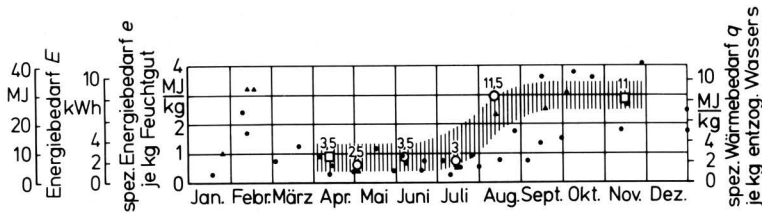


Bild 17. Energiebedarf E, spezifischer Energiebedarf e und spezifischer Wärmebedarf q im Verlauf des Jahres.

- ○ $U_4 = 0,15$
- ▲ $U_4 = 0,20$
- $U_4 = 0,25$

Gut: biologisch behandelte, aggregierter Rinderflüssigmist
 m = 10 kg
 Schichthöhe: $H = 230$ mm
 Luftdurchsatz: $\dot{V}_L = 930$ m³/h m²
 Versuchszeitraum: 1974 bis 1976

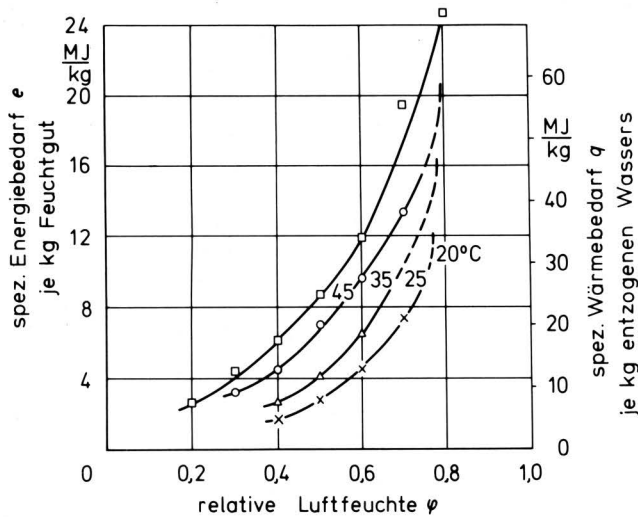


Bild 18. Spezifischer Energiebedarf e und spezifischer Wärmebedarf q für die Trocknung vom Feuchtegehalt $U_3 = 0,50$ auf $U_4 = 0,15$ bei 1 m Schichthöhe in Abhängigkeit von der relativen Feuchte der Trocknungsluft für verschiedene Trocknungslufttemperaturen ausgehend von den Mittelwerten der Außenluft $\vartheta = 9,1$ °C, $\varphi = 0,79$.

Standard-Gut
 Luftdurchsatz $\dot{V}_L = 800$ m³/h m²

Der spezifische Wärmebedarf q wurde für die Monate April bis Juli zu 2,3 MJ/kg gemittelt, für die Monate August bis November zu 8,3 MJ/kg. Hätte man die Belüftung nach Erreichen eines Restfeuchtegehaltes $U_4 = 0,20$ beendet, betrügen die entsprechenden Werte 2,0 MJ/kg und 6,4 MJ/kg.

Beim Trocknen mit konditionierter Luft und dem verwendeten Durchströmrockner ist die Trocknungsluft der alleinige Träger der aufgenommenen Heiz- und Gebläseenergie. Der Energieanteil für das Gebläse ist hier von untergeordneter Bedeutung, der für die Erwärmung wird von der erforderlichen Trocknungszeit, dem Massenstrom der Luft sowie von der Enthalpiedifferenz zwischen dem Zustand der Außenluft und dem Zustand beim Eintritt in den Trockner bestimmt [15]. Diese Enthalpiedifferenz wurde auf der Basis der nach Unterlagen der örtlichen Wetterstation zusammengestellten Klimamittelwerte der Jahre 1971–1975 errechnet ($\bar{\vartheta} = 9,1$ °C, $\bar{\varphi} = 0,79$ mit $\bar{x} = 0,0057$). Der Enthalpieinhalt der Abluft steht zwar als Exergie zur Verfügung [16, 17], muß aber, wenn er nicht über einen Wärmetauscher rückgewonnen werden kann, ebenfalls als Verlust angesehen werden.

Den ermittelten spezifischen Energiebedarf e , bezogen auf 1 kg zu trocknendes Gut m_3 , bzw. den spezifischen Wärmebedarf q zeigt Bild 18.

3. Beurteilung der Ergebnisse

3.1 Biologische Behandlung

Aus dem Temperaturverlauf bei der Selbsterhitzung von Gemengen aus Flüssigmist und Rückgut wird deutlich, daß Gemenge in krümeliger Form (bei Schütthöhen über 0,5 m) ohne eine Zwangsbelüftung nicht mehr über die gesamte Höhe ausreichend mit Sauerstoff versorgt werden. Dagegen erwärmen

sich aus diesem Gemenge hergestellte Preßlinge noch bei einer Schütthöhe von 3,5 m. (Wenn auch zu beachten ist, daß das Luftvolumen Λ_L in der Säule mit einem relativ engen Durchmesser günstiger ist als in einem Reaktor im technischen Maßstab bzw. einer Miete).

Im Hinblick auf eine hygienisierende Wirkung ist daher die Selbsterhitzung von Krümeln in größeren Schütthöhen im Vergleich zu Preßlingen ungünstiger, da sich nur die oberste Schicht ausreichend erhitzt. Bei Preßlingen kommt es in der untersten Schicht, durch die in der verwendeten Versuchsordnung nahezu die gesamte Luft geführt wird, zu einer Abkühlung. Durch Drosselung des selbstangesaugten Luftstroms ließe sich in einem technischen Verfahren dieser Nachteil sicher vermeiden. Da Hygienisierung und Höhe der Stickstoffverluste sich in Abhängigkeit von der Temperatur konträr verhalten, ist eine Selbsterhitzung von Krümeln in größeren Schütthöhen günstig, wenn die Stickstoffverluste minimiert werden sollen.

Auf den Geruch des Endproduktes hat der Temperaturverlauf keinen Einfluß, da selbst bei niedrigeren Temperaturen, solange anaerobe Verhältnisse ausbleiben, keine unangenehmen Gerüche auftreten. Lediglich beim Aufbrechen von Preßlingen treten kurzzeitig unangenehm faulige Gerüche auf. Mit zunehmender Abtrocknung des Gutes verschwinden diese Gerüche vollständig. Das Auftreten anaerober Verhältnisse in den Preßlingen ließe sich möglicherweise verhindern, wenn durch Verringerung des Durchmessers oder Herstellung eines Hohlkerns die Luftversorgung verbessert würde.

3.2 Trocknung

Die beim Trocknen mit Außenluft erzielten Restfeuchtegehalte lagen während langer Zeitspannen des Jahres in dem Bereich, der für das Verfahren gefordert wird. Sie erscheinen, gemessen an den während der Trocknungsphase herrschenden durchschnittlichen Luftzustandswerten, sehr niedrig. Dies kann mit der diesem Gut eigenen ausgeprägten Hysterese zwischen Desorption und Adsorption [18] sowie aus den großen Schwankungen des Luftzustandes, z.B. zwischen Tag und Nacht, erklärt werden. So wird der etwa bei mittäglicher Sonneneinstrahlung unter günstigen Luftbedingungen erreichte Trocknungsfortschritt kaum durch zum Wiederbefeuchten neigende nächtliche Luftbedingungen beeinträchtigt.

Der Energiebedarf, bei den Versuchen für eine Schichthöhe von 0,23 m ermittelt, ist witterungsabhängig.

Als Vorteil dieses Verfahrens muß die einfache, mit geringen Investitionskosten behaftete Belüftungseinheit gewertet werden. Der entscheidende Nachteil besteht in der Unsicherheit, den Zeitbedarf bis zum Erreichen einer bestimmten Restfeuchte vorherbestimmen zu können. Er lag jedoch unter den gegebenen Klimabedingungen immer unter drei Wochen.

Für das Trocknen mit konditionierter Luft ist der erreichbare Restfeuchtegehalt des Gutes aus den Desorptionsisothermen ablesbar und der erforderliche Zeit- und Energiebedarf bei den Versuchen entsprechenden Randbedingungen vorherbestimmbar. Von den vier untersuchten Trocknungslufttemperaturen erweist sich die Temperatur $\vartheta_L = 45^\circ\text{C}$ bei einer relativen Luftfeuchte $\varphi < 0,2$ hinsichtlich Energie- und Zeitbedarf als am günstigsten. Der dabei ermittelte spezifische Wärmebedarf beträgt $q \approx 6,5 \text{ MJ/kg}$ und hat damit etwa die Größenordnung, die bei der Körnermaistrocknung erreicht wird [17]. Der Zeitbedarf beträgt $t_{1,5,1} \approx 1,35 \text{ d}$. Temperaturerhöhungen bewirken eine überproportionale Verkürzung der Trocknungszeit [19].

Die erforderliche Trocknungszeit nimmt mit der Schichthöhe weniger als proportional zu. Der daraus abzuleitende Vorteil größerer Schichthöhen wird jedoch begrenzt von der gleichzeitig zunehmenden Gefahr der Rekondensation.

Die Aussagekraft der vorliegenden Ergebnisse muß sich auf die Angabe von Tendenzen beschränken, da sie nur auf dem einen Luftdurchsatz $\dot{V}_L = 800 \text{ m}^3/\text{h m}^2$ und der einen Schichthöhe $h = 1 \text{ m}$ beruhen. Zeit- und Energiebedarf können sich mit der Variation dieser Parameter ändern, was in weiteren Versuchen geklärt werden soll.

Da mit der Erhöhung der Temperatur der Trocknungsluft auch die Temperaturdifferenz zur Umgebungsluft größer wird und damit die Verluste, insbesondere durch Wärmeabstrahlung, überproportional anwachsen, ist damit zu rechnen, daß der für die Trocknung erforderliche Energiebedarf nach Erreichen eines Minimums im höheren Temperaturbereich wieder ansteigen wird.

Der Vorteil des Trocknens mit erwärmter Luft besteht in der Sicherheit, den gewünschten Feuchteentzug und den Zeitbedarf vorherbestimmen zu können. Der Energiebedarf für das Trocknen mit Außenluft unterscheidet sich nur bei sommerlich-günstigen Luftbedingungen wesentlich von dem, der bei Verwendung konditionierter Luft erforderlich ist. So dürfte die vorteilhafteste Lösung die Kombination der beiden untersuchten Trocknungsverfahren sein. Das Gut sollte, wenn immer es die Witterung zuläßt, mit naturgegebener Außenluft und bei ungünstigen Luftbedingungen nach bedarfsweisem Zuschalten eines Heizgerätes mit zusätzlich erwärmter Luft getrocknet werden.

4. Verfahrenslösungen

Die Modellversuche haben gezeigt, daß die Kompostierung eines Flüssigmist-Rückgut-Gemenges in krümeligem Zustand wie auch in aggregierter Form, d.h. zu Preßlingen verarbeitet, in der erwünschten Weise möglich ist, falls der notwendige Feuchtegehalt vorliegt und der Sauerstoffbedarf gedeckt ist. Welcher der beiden Strukturformen bei der biologischen Stufe des Verfahrens der Vorzug zu geben ist, läßt sich aus den Modellversuchen noch nicht mit Sicherheit ableiten. Diese Entscheidung setzt zunächst die Betrachtung prinzipieller Lösungsalternativen voraus, bei welcher das Zusammenwirken der einzelnen Verfahrensschritte hinsichtlich Stofffluß, Energiebedarf, Bedienung, Überwachung und Steuerung, Betriebssicherheit und konstruktivem Aufwand berücksichtigt werden muß.

4.1 Rotten krümeligen Gemenges

Mit einer halbtechnischen Anlage, die gemäß dem in Bild 1 dargestellten Verfahrensablauf aufgebaut war, bei der jedoch das Gut nach der Kompostierung zu Preßlingen geformt wurde, um günstige Voraussetzungen sowohl für die Trocknung des Rückgutes als auch für das Lagern und Handhaben des Produktes zu schaffen, konnten wichtige Erkenntnisse über die Betriebsweise einer vollständigen Verfahrenskette gewonnen werden [1, 7]. Hieraus ließen sich Hinweise für den Aufbau einer Behandlungsanlage im technischen Maßstab ableiten, deren wesentliche Merkmale in Bild 19 als Beispiel wiedergegeben sind.

Dem Mischer b wird mit einer Dosierpumpe a frischer Flüssigmist und gleichzeitig mit einem dosierenden Stetigförderer zerkleinertes trockenes Rückgut aus dem Speicher h zugeführt. Das Gemenge gelangt von oben in den in Zellen-Baukastenweise ausgeführten Rottebehälter c, der im Durchlaufverfahren absetzig oder kontinuierlich mit einer Verweilzeit des Gutes von 2 bis 4 Tagen betrieben wird. Das Austragsystem am Behälterboden muß so gestaltet sein, daß die Abwärtsbewegung des Gutes über den gesamten Querschnitt der einzelnen Behälterzellen gleichmäßig ist und die Luft ungehindert von unten in die Schüttung eintreten kann.

Dem Rottebehälter ist die Preßeinrichtung d nachgeordnet, von der die Preßlinge über einen Stetigförderer in einem Teilstrom zum Trockner f gelangen — dieser kann wie die Rottebehälter aufgebaut sein und wird ebenso im absetzigen oder kontinuierlichen Gutsdurchlauf sowie mit Gegenstrombelüftung betrieben —, der Hauptstrom wird jedoch bereits vor dem Trockner abgezweigt und auf das Lager gebracht. Das getrocknete Rückgut wird in einer Hammermühle g zerkleinert und pneumatisch in den Zwischenspeicher gefördert. Durch Rückführen des Trägerluftstromes

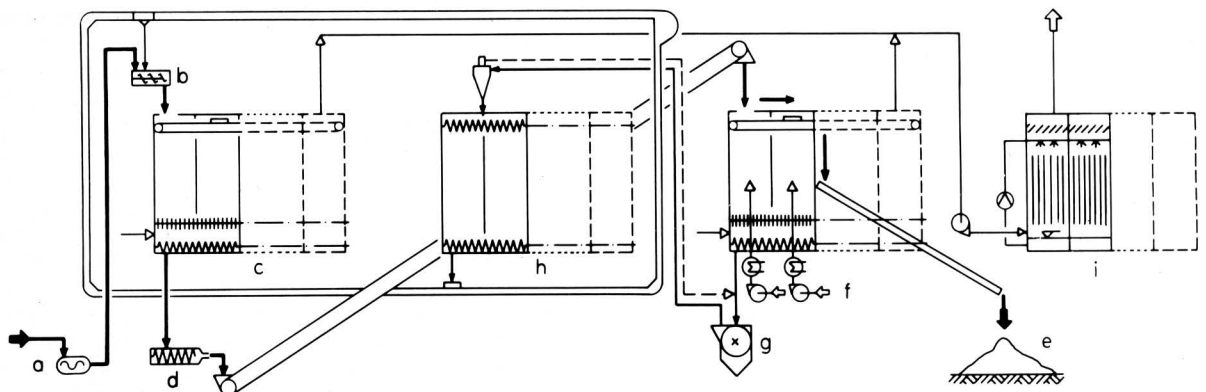


Bild 19. Aufbau einer Behandlungsanlage für die Rotte krümeligen Gutes.

- | | |
|------------------------|-------------------|
| a Dosierpumpe | f Trockner |
| b Mischer | g Hammermühle |
| c Kompostierzellen | h Rückgutspeicher |
| d Presse | i Abluftwäscher |
| e Lager für Endprodukt | |

zur Hammermühle läßt sich ein nahezu staubfreier Betrieb erreichen. Die mit Umsetzungsprodukten, vorwiegend mit Ammoniak, beladenen Abgase aus Rottebehälter und Trockner müssen unter Umständen vor Abgabe ins Freie, zum Beispiel mit einem Gaswäscher i, gereinigt werden.

Durch die Gestaltung der Behälter in Zellenbauweise ergibt sich die Möglichkeit des Aufbaus einer Anlage im Baukastensystem mit dem Vorteil der kostengünstigen Anpassung der Anlagengröße an unterschiedliche Kapazitätsanforderungen²⁾.

4.2 Rotten brikettierten Gutes

Aufgrund der Ergebnisse aus den Modellversuchen kann es zweckmäßig sein, das Gemenge bereits vor der Kompostierung zu Preßlingen zu verformen. Die als Rückgut benötigte Gutmenge verbleibt nach Ablauf der vorgegebenen Kompostierzeit in dem jeweiligen Behälter und wird dort auch getrocknet. Die Hauptmenge wird nach der Kompostierung auf das Lager gebracht, falls die Lagerkapazität nicht über die Kompostierbehälter selbst abgedeckt ist.

Zwei Beispiele für den Aufbau einer Verfahrenslinie zur Rotte brikettierten Gutes seien hier genannt.

Das Verfahren kann entweder in einem vollmechanisierbaren System in kompakter Bauweise oder aber teilmechanisierbar in offener Bauweise ausgeführt werden.

In kompakter Bauweise könnte eine Anlage gemäß Bild 20 aufgebaut sein. Sie unterscheidet sich von dem in Bild 19 gezeigten Aufbau im wesentlichen durch die Anordnung der Presse c vor der Kompostierstufe d bzw. f und durch die Zusammenfassung des Trockners f mit einer Teilkapazität der Kompostierbehälter. Bei dieser kombinierten Stufe wird das Gut nach dem Kompostieren in derselben Schüttung getrocknet.

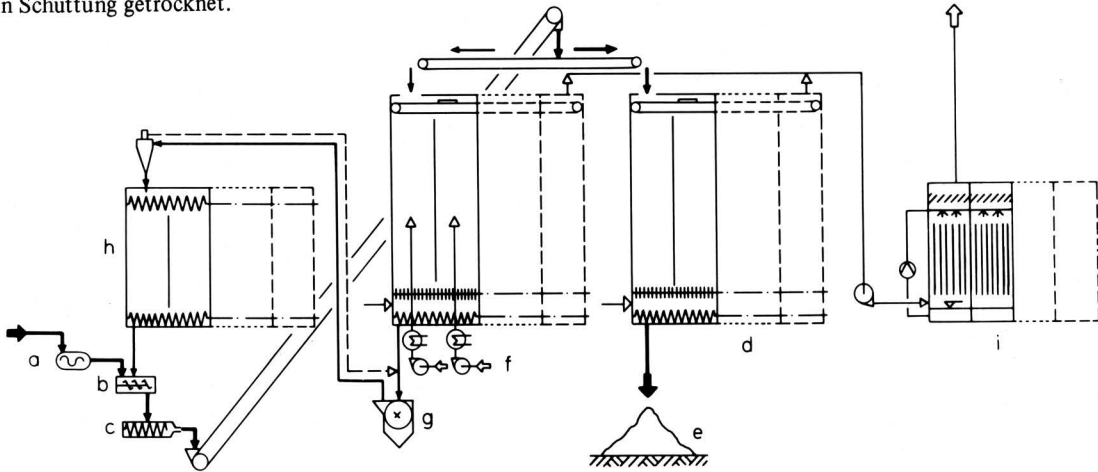


Bild 20. Aufbau einer Behandlungsanlage in Kompaktbauweise für die Rotte brikettierten Gutes.

- | | |
|------------------------|--------------------------------|
| a Dosierpumpe | f Kompostier- u. Trockenzellen |
| b Mischer | g Hammermühle |
| c Presse | h Rückgutspeicher |
| d Kompostierzellen | i Abluftwäscher |
| e Lager für Endprodukt | |

Bei der aufgelösten Bauweise nach Bild 21 sind die der Aufbereitung dienenden Anlagenteile in einer Einheit zusammengefaßt, die gegebenenfalls auch ortsveränderlich sein kann. Die Preßlinge werden von diesem Aufbereitungsteil in einen gesonderten Behandlungsteil d gefördert. Dieser kann z.B. als Mieten- oder Containersystem ausgeführt sein. In jedem Fall muß bodenseitig ein freier Luftzutritt möglich sein. Um die als Rückgut benötigte Menge trocknen zu können, werden ein entsprechend abgeteilter Mietenbereich bzw. die notwendige Anzahl Container nach der vorgegebenen Kompostierungszeit belüftet. Steht genügend Lagerkapazität zur Verfügung, kann auch — sofern günstige Luftfeuchtegehalte vorherrschen — der erforderliche Feuchteentzug ohne Zwangsbelüftung erreicht werden. Andererseits zwingen ungünstige Klimaverhältnisse und begrenzte Lagerkapazitäten zum Einsatz von

²⁾ Über eine nach diesem Konzept errichtete Versuchsanlage und die mit dieser gewonnenen Betriebserfahrungen soll in der in Kürze in dieser Zeitschrift erscheinenden dritten Mitteilung berichtet werden.

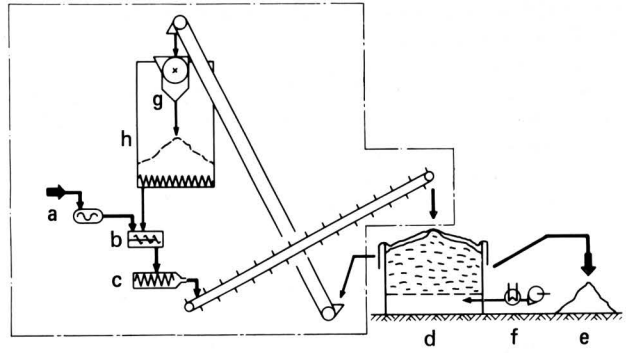


Bild 21. Aufbau einer Behandlungsanlage in offener Bauweise für die Rotte brikettierten Gutes.

- | | |
|--------------------|----------------------------------|
| a Dosierpumpe | e Lager für Endprodukt |
| b Mischer | f ortsveränderliches Heizgebläse |
| c Presse | g Hammermühle |
| d Kompostierzellen | h Rückgutspeicher |

Heizgebläsen. Eine weitere Vereinfachung der technischen Ausführung dieses vor allem für mittlere landwirtschaftliche Betriebsgrößen gedachten Anlagensystems ist durch Verwendung eines Chargenmischers anstelle des Durchlaufmischers gegeben, da dann die Dosiereinrichtungen für Flüssigmist und Rückgut sowie die Steuerung des Mischungsverhältnisses der beiden Komponenten entfallen können.

5. Zusammenfassung

Für das in einer früheren Mitteilung [1] begründete und durch erste Versuchsergebnisse erläuterte Verfahren zur Gewinnung von Feststoffen aus tierischen Exkrementen werden für die wichtigsten Verfahrensstufen "Biologische Behandlung" und "Trocknung" weitere Erkenntnisse bekanntgegeben. Diese stützen bzw. ergänzen die früheren Ergebnisse und zeigen insbesondere Funktionsmerkmale auf, die für die technische Verwirklichung des Verfahrens wesentlich sind. Es werden die Feuchtegehaltsbereiche von Gemengen aus Flüssigmist verschiedener Tierarten und Rückgut genannt, die bei der biologischen Behandlung einen sicheren aeroben Prozeß gewährleisten. Entscheidend für den erforderlichen Gasaustausch in der Gemengeschüttung ist deren Gasdurchlässigkeit, die bei größerer Füllhöhe durch Verdichtung der tieferen Schichten beeinträchtigt werden kann. Durch Aggregieren des Gemenges vor der Rotte zu Preßlingen mit einem Durchmesser im Bereich von 30 bis 40 mm kann dieser Nachteil beseitigt werden.

Der Rotteprozeß läuft in derartig grobkörnigen Schüttungen ohne Zwangsbelüftung ab. Die durch mikrobielle Selbsterhitzung erzeugten Temperaturen bis 75 °C führen bereits nach 1 bis 2 Tagen zu einer Abtötung von Krankheitserregern; jedoch auch zu Stickstoffverlusten. Die Steuerung der Rottetemperatur ist im Hinblick auf die konträren Forderungen nach Hygienisierung und Stickstoffhaltung eine wichtige technische Maßnahme beim Einsatz des Verfahrens.

Die Möglichkeiten der Trocknung des Rückgutes mit naturgegebener Frischluft konnten durch Versuche über größere Zeiträume unter Berücksichtigung der typischen kurzfristigen und jahreszeitlichen Klimaschwankungen bestimmt werden.

Nimmt man Trocknungszeiten bis zu 3 Wochen in Kauf, dann kann unter den Klimabedingungen am Versuchsort im überwiegenden Teil des Jahres ohne Heizenergie getrocknet werden. Die Rückguttrocknung simultan zur biologischen Behandlung bei Verweilzeiten von wenigen Tagen ist nur mit zusätzlicher Lufterwärmung möglich. An drei Beispielen werden prinzipielle Möglichkeiten aufgezeigt, das Verfahren in technischen Anlagen zu verwirklichen, wobei insbesondere die Rotte brikettierten Gutes Lösungswege erschließt, die schon in mittelgroßen Tierhaltungsbetrieben einen wirtschaftlichen Einsatz des Verfahrens erwarten lassen. (Wird fortgesetzt)

6. Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] Baader, W., F. Schuchardt u. H. Sonnenberg: Untersuchungen zur Entwicklung eines technischen Verfahrens für die Gewinnung von Feststoffen aus tierischen Exkrementen (1. Mitteilung). *Grundl. Landtechnik* Bd. 25 (1975) Nr. 2, S. 33/42.
- [2] Strauch, D. u. H. Schwab: Hygienische Überprüfung eines Verfahrens zur Überführung flüssiger Exkremente in einen umweltfreundlichen Feststoff mit hohem Nutzwert. *Dt. Tierärztl. Wschr.* Bd. 81 (1974) S. 313/16.
- [3] Enigk, K.: Persönl. Mitteilung.
- [4] Straub, O.C., Bundesforschungsanstalt für Viruskrankheiten der Tiere, Tübingen: Persönl. Mitteilung.
- [5] Platz, S.: Untersuchungen über das Verhalten pathogener Mikroorganismen bei der Heißverrottung von Hühnerkot. *Zbl. Vet. Med., B* (im Druck).
- [6] Platz, S. u. S. Matthes: Die Heißrotte als Möglichkeit zur Gewinnung hygienisch unbedenklichen Geflügelkotkompostes und dessen Verwertung als Tierfutter. *II. Congress of Intern. Society of Animal Hygiene, Zagreb* 29.9.–2.10.76. *Collected Report* S. 592/96.
- [7] Baader, W. F. Schuchardt, H. Sonnenberg u. H. Söchtig: Die Gewinnung eines lagerfähigen und landwirtschaftlich nutzbaren Feststoffes aus Rinderflüssigmist. *Ber. über Landwirtschaft*, 192 (1975) S. 798/835.
- [8] Tietjen, C.: The yield efficient nitrogen portion in treated and untreated manure. *Commission of the European Communities; Seminar on Land Spreading of Manure. Modena, Italy, Sept. 20–24, 1976.*
- [9] •Glathe, H. u. G. Farkasdi: Biologie und Hygiene der Kompostierung. In: *Müll- und Abfallbeseitigung*, Bd. 3, Kennz. 5040, Berlin: Verlag Erich Schmidt, 1966.
- [10] •Pöpel, F. u.a.: Die Beseitigung von Abfallstoffen durch Kompostierung. In: *Müll- und Abfallbeseitigung*, Bd. 3, Kennz. 5300, Berlin: Verlag Erich Schmidt, 1964.
- [11] •Scheffer, F. u. P. Schachtschabel: *Lehrbuch der Bodenkunde*, 6. Auflage, Stuttgart: Enke, 1966.
- [12] •Hofmann, K.A. u. W. Rüdorff: *Anorganische Chemie*. Braunschweig: Vieweg 1966.
- [13] •Kneule, F.: *Das Trocknen*. Aarau, Frankf. Main: Sauerländer 1975.
- [14] Matthes, R.K. u. G.B. Welch: Heated air drying of soybean seed. *ASAE-Paper* no. 74-3001 (1974).
- [15] •Krischer, O. u. K. Kröll: *Trocknungstechnik*, Bd. 1 (Krischer: Die wissenschaftl. Grundlagen der Trocknungstechnik). Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1963.
- [16] •Baehr, H.D.: *Thermodynamik*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1966.
- [17] Mühlbauer, W. u. W. Isaacs: Wärmerückgewinnung bei Körnerfruchttrocknungsanlagen, *Landtechnik* Bd. 30 (1975) Nr. 11, S. 479/84.
- [18] Zsigmondy, R.: Über die Struktur des Gels der Kieselsäure; Theorie der Entwässerung. *Z. anorg. allg. Chem.* Bd. 71 (1911) 4, S. 356/77.
- [19] •Strehler-Pöpel, A.: Die Trocknungslufttemperatur bei der Körnermaistrocknung in ihrer Auswirkung auf Trocknungstechnik, Futterqualität und Kosten. *Diss. TU München* 1974.

Notizen aus Forschung, Lehre, Industrie und Wirtschaft

Landtechnik als Teilgebiet einer umfassenden Lebensmitteltechnologie.

Bericht vom „First International Congress on Engineering and Food“

Der 'First International Congress on Engineering and Food', der vom 9. bis zum 13. August dieses Jahres in Boston, Mass., USA stattfand, machte eindringlich bewußt, daß sowohl die Landtechnik als auch die Lebensmitteltechnik aufgerufen sind, ihren Beitrag zu einer ertragreichen Erzeugung und einer verlustarmen Be- und Verarbeitung und Aufbewahrung von Nahrungsmitteln zu leisten, um der Hungersnot in aller Welt zu begegnen.

Die Landtechniker der USA, repräsentiert durch die ASAE, veranstalteten diesen Kongress, unterstützt von zahlreichen namhaften Institutionen und Vereinigungen der Lebensmittelforschung und -verarbeitung in Amerika und Europa. Sie dokumentierten damit

erneut ihr Selbstverständnis und die weiten Grenzen ihres Tätigkeitsfeldes, sich nicht nur für technische Einrichtungen und Verfahren zur Erzeugung von Nahrungsgrundprodukten, sondern auch für alle folgenden Stufen der Lebensmittelherstellung, -aufbewahrung und -verteilung bis hin zur Abfallverwertung zuständig und kompetent zu fühlen.

Die Organisatoren vom 'Department of Food and Agricultural Engineering' der Universität von Massachusetts in Amherst unter der Leitung von Prof. J.T. Clayton hatten als Ziel dieses Treffens herausgestellt, das Zusammenwirken von Methoden und Arbeitsweisen der Ingenieure mit den biologisch-chemischen Kenntnissen der Agrar- und Lebensmittelwissenschaftler anhand bisheriger Erfolge und zukünftiger Aufgaben zu umreißen. Dabei stand der Zwang zur Verbesserung und Ausweitung der technischen Handhabung biologischer Systeme unter dem Eindruck steigender Bevölkerungszahlen und wachsender Hungersnöte im Vordergrund.