

- [ 4 ] Prummel, J. u. P. Datema: Strooregelmaat van kunst-meststrooiers en de betekenis daarvan voor de opbrengst. Landbouwmecanisatie Bd. 13 (1962) S. 742/52.
- [ 5 ] •Weber, E.: Grundriß der biologischen Statistik. 7. Aufl., Stuttgart: G. Fischer 1972, S. 96.
- [ 6 ] Zschuppe, H.: Anforderungen an die Streugenaugigkeit von Düngerstreuern, untersucht am Einfluß ungleichmäßig verteilten Stickstoffdüngers auf den Ertrag von Winterroggen. Diss. Dt. Akademie der Landwirtschaftswissenschaften, Berlin 1967.
- [ 7 ] Zschuppe, H.: Untersuchungen über den Einfluß der Streugenaugigkeit von Düngerstreuern auf den Pflanzenertrag. Archiv für Landtechnik (1968) Nr. 1, S. 111/20.
- [ 8 ] •Rühle, K.: Die Mineraldüngerverteilung unter besonderer Berücksichtigung pneumatischer Streugeräte. Diss. Univ. Bonn, 1975 (KTBL Schrift 198, 1975).
- [ 9 ] Seemann, B.: Maschinen für die Mineraldüngung. Agrartechnik Bd. 24 (1974) Nr. 3, S. 114/17.
- [ 10 ] •Schaefer-Kehnert, W.: Die Kosten des Landmaschineneinsatzes. Berichte über Landtechnik H. 74, Wolfratshausen 1963.
- [ 11 ] Ebert, D. u. W. Klein: Verminderung der Ertragsschwankungen bei Mähdruschfrüchten — große Ertragsreserve. Feldwirtschaft Bd. 13 (1972) Nr. 6, S. 250/52.
- [ 12 ] Hannusch, L. u. C. Schmidt: Beziehungen zwischen Ernteertrag und qualitätsgerechter Mineraldüngerausbringung in der Kooperation Görzig. Feldwirtschaft Bd. 12 (1971) Nr. 10, S. 465/67.
- [ 13 ] Jauert, R., H. Ansorge u. L. Hannusch: Durch optimale Düngung zu hohen Erträgen in der kooperativen Pflanzenproduktion. Feldwirtschaft Bd. 13 (1972) Nr. 6, S. 261/63.
- [ 14 ] Isensee, E.: Beurteilung von Arbeitsverfahren der Mineraldüngung. Die Landarbeit Bd. 24 (1973) Folge 4, S. 27.

## Untersuchung der verbrennungstechnischen Eigenschaften von Getreidestroh

Von Hans Wilhelm Orth, Heinrich Peters und Uwe Köhler, Braunschweig\*)

DK 662.636:633.004.12

Die Verbrennung von Stroh zur Nutzung der dabei freierwerdenden Wärme kann eine Teillösung des Strohproblems sein. Als Nutzungsmöglichkeiten bieten sich die Gebäudeheizung und die Heizung der Trocknungsanlagen in der Landwirtschaft an.

Zur Auswahl der erforderlichen Verbrennungseinrichtungen werden die bisher nicht bekannten verbrennungstechnischen Eigenschaften von Stroh in einem Versuchsofen technischer Größe ermittelt und für Strohaufwerke unterschiedlicher Schütt- und Einzelaggregatdichte beschrieben.

Es zeigte sich, daß der für eine schadstoffarme Verbrennung erforderliche Ofentyp und die gewünschte Verbrennungsgeschwindigkeit maßgeblich von der spezifischen Oberfläche des Brenngutes abhängig sind.

### 1. Einleitung

Die Vernichtung wertvoller Rohstoffe beim Abflammen von Getreidestroh auf dem Felde und die damit verbundene Verunreinigung und Gefährdung der Umwelt läßt erkennen, daß dieses Verfahren nur in Ausnahmefällen eine Lösung des Strohproblems sein sollte.

\*) Dr.-Ing. H.W. Orth ist Wissenschaftlicher Oberrat, Ing. (grad.) H. Peters Versuchsingenieur im Institut für Landmaschinenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Baader) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode. Dr.-Ing. U. Köhler ist Akademischer Oberrat am Institut für Wärme- und Brennstofftechnik (Direktor: Prof. Dr. techn. R. Dolezal) der Technischen Universität Braunschweig.

Betrachtet man den Heizwert dieses Materials, welcher je nach Getreideart und Feuchte bis 18000 kJ/kg und damit beinahe Werte von Holz, Torf und Braunkohlebriketts erreicht, so kann eine Teillösung des Strohproblems in der Nutzung der bei der Verbrennung freierwerdenden Wärme liegen. Als Nutzungsmöglichkeiten bieten sich die Gebäude-Heizung und die Heizung der Trocknungsanlagen in der Landwirtschaft an.

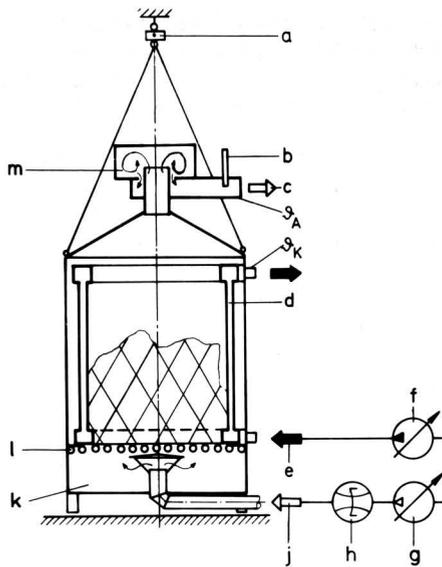
Die Wahl der erforderlichen Verbrennungseinrichtungen richtet sich in erster Linie nach den verbrennungstechnischen Eigenschaften des verwendeten Brennstoffes [1].

Für den Brennstoff Stroh, welcher in unterschiedlich aufbereiteter Form eingesetzt werden kann, sind diese Eigenschaften nicht bekannt. In der vorliegenden Arbeit wurden sie für Haufwerke unterschiedlicher Schütt- und Einzelaggregatdichte wie Ballen aus Hochdruckpressen (HD-Ballen), Briketts und Häcksel wegen des einfachen Aufbaues in einem Durchbrandofen untersucht.

### 2. Versuchsaufbau

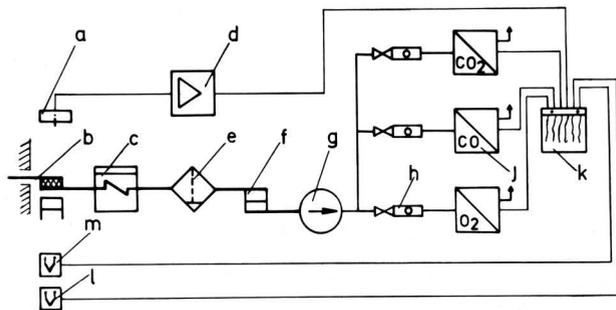
Der Versuchsofen besteht im wesentlichen aus einer Brennkammer mit luftgekühltem Rost und Mantel, Bild 1. Eine Kraftmeßdose a mißt den Brennstoffumsatz. Wegen der möglicherweise ungleichmäßigen Verbrennung im Ofen wird das Abgas vor Entnahme der Proben für die Analyse b in einem Mischer m vermischt. Temperaturmeßstellen sind vorhanden im Abgaskanal hinter dem Mischer ( $\vartheta_A$ ) und zur Kontrolle der Kühlmitteltemperatur am Kühlmittelaußlaß ( $\vartheta_K$ ).

Zur Beurteilung der Verbrennung werden die entstehenden Abgase mit automatischen Gasanalysengeräten auf ihren Gehalt an CO, CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> hin untersucht, Bild 2. Alle Messungen erfolgen während des Versuches kontinuierlich, um auch die Vorgänge beim An- und Abfahren des Ofens zu erfassen.



**Bild 1.** Versuchsofen zur Verbrennung von Stroh (Schema).

- |                    |                    |
|--------------------|--------------------|
| a Kraftmeßdose     | g Gebläse          |
| b Abgassonde       | h Volumenzähler    |
| c Abgas            | j Verbrennungsluft |
| d gekühlter Mantel | k Ascheraum        |
| e Kühlmittel       | l gekühlter Rost   |
| f Pumpe            | m Mischer          |
- $\vartheta_A, \vartheta_K$  Abgas-, Kühlmitteltemperatur



**Bild 2.** Meßwerterfassung.

- |                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| a Kraftmeßdose                       | g Pumpe                                     |
| b Abgassonde mit Filterstein         | h Einstellventil                            |
| c Meßgaskühler                       | j Gasanalysatoren                           |
| d Verstärker                         | k Mehrkanallinienschreiber                  |
| e H <sub>2</sub> O Absorptionsfilter | l, m Thermolemente für Abgas und Kühlmittel |
| f Membranfilter                      |   |

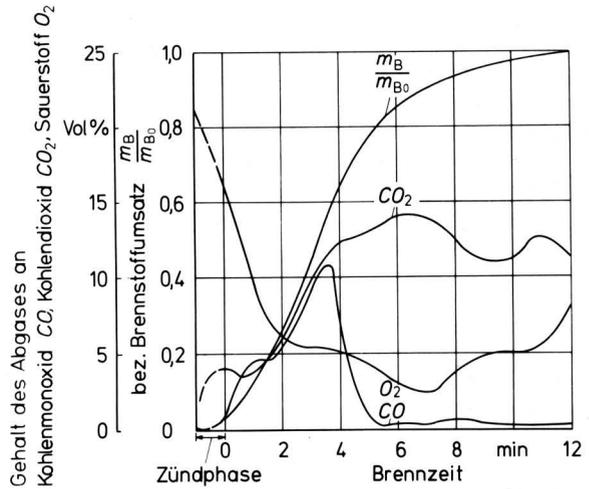
### 3. Versuchsergebnisse

Bei den umfangreichen Brennversuchen wurden folgende Parameter variiert: Aggregat- und Schüttdichte, Haufwerkshöhe, Rostfläche und Verbrennungsluft.

#### 3.1 Verbrennung von HD-Ballen

Die bei der Verbrennung von HD-Bällen registrierten Versuchsdaten zeigt als Beispiel **Bild 3**. Im Anschluß an die Zündphase ist ein relativ großer Umsatz des Brennstoffes, hier jeweils in Trockenmasse und bezogen auf die eingewogene Brennstoff-Trockenmasse  $m_{B0}$  dargestellt, zu erkennen. Der Abbrand, definiert als die verbrannte Brennstoffmasse je Zeiteinheit, ist hierbei, wie der angenähert lineare Anstieg der Kurve für  $m_B/m_{B0}$  zeigt, zunächst konstant. Er entspricht in diesem Beispiel einer kurzfristigen Umsetzung von ca. 200–300 kg/h. Aufgrund dieses großen Umsatzes

tritt in der Versuchsanordnung in diesem Zeitabschnitt ein größerer Anteil von CO im Abgas auf, d.h. es liegt eine unvollkommene Verbrennung vor. Hiermit verbunden ist eine Verunreinigung der Abluft mit giftigen Bestandteilen und gleichzeitig eine unvollständige Freisetzung des im Ausgangsstoff vorhandenen Energieinhaltes, da bei der Verbrennung von CO zu CO<sub>2</sub> in einer exothermen Reaktion je m<sup>3</sup> noch ca. 12000 kJ erzeugt werden. (5 Vol.-% CO im Abgas entsprechen bei Stroh etwa einem Verlust durch unvollkommene Verbrennung von 15 %.)



**Bild 3.** Verbrennungsverlauf einer Strohprobe von HD-Bällen.

Einwaage  $m_{B0}$  = 25 kg  
 Feuchtegehalt 0,1  
 Rostfläche 1,32 m<sup>2</sup>  
 Verbrennungsluftdurchsatz 500 m<sup>3</sup>/h

Ein weiterer Verlust ist in dem ebenfalls entstehenden Rauch durch den in ihm vorhandenen unverbrannten Kohlenstoff zu erkennen.

Die sehr starke Reaktion zu Beginn des Verbrennungsvorganges ist zurückzuführen auf den strukturellen Aufbau des Brennstoffes Stroh.

Ein Merkmal fester Brennstoffe allgemein ist der Anteil leichtflüchtiger Bestandteile. Er steigt mit abnehmendem Kohlenstoffanteil und erreicht Werte bei Stroh und Holz von über 80 %. Diese leichtflüchtigen Bestandteile vergasen nach der Zündung der Strohprobe sehr schnell und können aufgrund nicht vorhandenen Sauerstoffes, eines evtl. noch zu geringen Temperaturniveaus und bei schlechter Mischung in der Brennkammer nicht vollständig verbrennen.

Auf eine ungenügende Mischung deutet auch das Ergebnis der gleichzeitigen Messung des Sauerstoffes hin, welche in diesem Bereich noch Werte von ca. 5 % aufzeigt.

Mit zunehmender Brennzeit werden die Bedingungen für eine vollständige Verbrennung verbessert. Das Temperaturniveau steigt an und der Brennstoffumsatz verlangsamt sich, so daß das entstehende Kohlenmonoxid fast vollständig verbrennt. Der Abfall des CO-Anteiles auf Werte unter 1 %, der gleichzeitig stetige Anstieg der Werte für CO<sub>2</sub> als dem Endprodukt der Verbrennung und der noch weiter verringerte Sauerstoffanteil zeigen die gute Verbrennung an. Eine Rauchentwicklung ist in diesem Bereich ebenfalls nicht mehr festzustellen.

Die Freisetzung leicht flüchtiger, brennbarer Gase im ersten Abschnitt der Verbrennung von HD-Bällen wird begünstigt durch die verhältnismäßig geringe Verdichtung des Strohs und die dadurch dem Verbrennungsluftstrom ausgesetzte große Oberfläche. Wird das Stroh stärker verdichtet, so ist die reaktionsfähige Oberfläche kleiner, der Vergasungseffekt wird geringer und damit die vollständige Verbrennung begünstigt.



**Bild 6** verdeutlicht bei konstantem Verbrennungsluftstrom und angenähert gleicher Einwaage den Unterschied in der Brenndauer bei den einzelnen Aufbereitungsformen. Alle Versuche zeigen den schon erwähnten Bereich angenähert konstanten Abbrandes. Mit zunehmender Dichte vergrößert sich die Brennzeit, d.h. der mittlere Energieumsatz wird geringer und außerdem bleibt der Abbrand über einen längeren Zeitraum konstant.

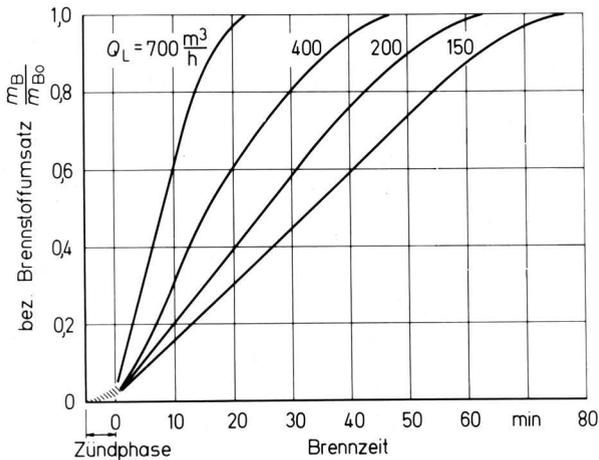
Für HD-Ballen stellt die Kurve 1 einen Versuchsablauf mit Ballen dar, welche die Rostfläche ausfüllen, die Kurve 2 einen Versuch, bei dem die Ballen nur eingeworfen wurden und damit zufällig verteilt sind. Durch die hierdurch vorhandenen brennstofffreien Rostflächen wird ein Teil der Verbrennungsluft nicht genutzt, der Umsatz ist daher gegenüber Kurve 1 entsprechend geringer.

### 3.4 Verbrennungsluftdurchsatz

Die Verdichtung bietet somit eine Möglichkeit, den Verbrennungsablauf entscheidend zu beeinflussen.

Eine weitere, normalerweise übliche Steuerung der Verbrennung geschieht durch Verändern des Verbrennungsluftdurchsatzes. Deshalb wurde in weiteren Versuchsreihen der Luftdurchsatz bei der Verbrennung von Stroh-Proben stufenweise gesteigert.

Durch die Steuerung des Verbrennungsluftdurchsatzes ist der Verbrennungsablauf für Strohbricketts in weiten Grenzen beeinflussbar, **Bild 7**. Bei großem Luftdurchsatz wird die Verbrennung verstärkt, durch Drosselung der Luftzufuhr verringert und über einen größeren Zeitraum konstant gehalten. In allen Versuchen mit Bricketts wurde der schon erwähnte, bezüglich CO-Gehalt und Rauchentstehung günstige Ablauf der Verbrennung festgestellt. Ein CO-Gehalt von 0,5 Vol.-% wurde in keinem Versuch überschritten.



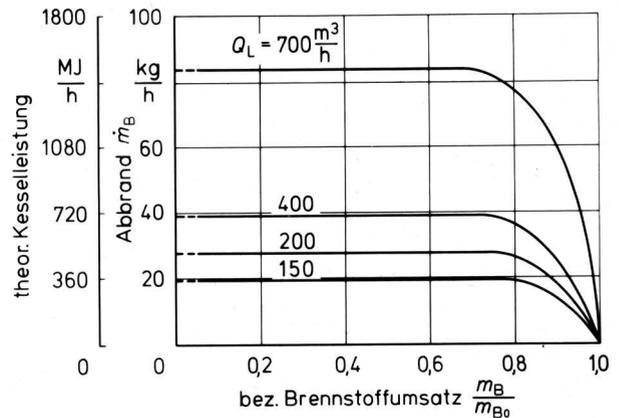
**Bild 7.** Verbrennung von Strohbrickett bei verschiedenem Verbrennungsluftdurchsatz.

Schüttdichte  $500 \text{ kg/m}^3$   
Haufwerkshöhe  $0,16 \text{ m}$   
Feuchtegehalt  $0,06$

Zur Verdeutlichung des Einflusses des Verbrennungsluftdurchsatzes auf den Brennstoffumsatz ist in **Bild 8** der aus der Steigung der Kurven  $m_B/m_{Bo} = f(t)$  zu errechnende Abbrand  $\Delta m_B/\Delta t$  in Abhängigkeit von der auf die Einwaage bezogenen schon verbrannten Brennstoffmasse dargestellt. Es ist festzustellen, daß für ca. 70 % der eingefüllten Brennstoffmasse ein angenähert konstanter Abbrand vorliegt. Erst danach geht der Abbrand und damit die Wärmefreisetzung zurück. Bei Bricketts steigt er in Abhängigkeit vom Verbrennungsluftdurchsatz im untersuchten Bereich bis auf ca.  $100 \text{ kg/h}$  an.

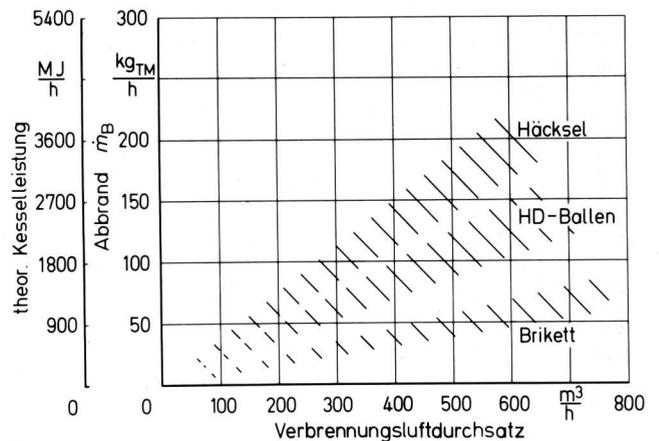
Für die Auslegung von Öfen interessiert nicht nur die größte, sondern auch die über die gesamte Versuchsperiode gemittelte Wärmefreisetzung für die untersuchten Aufbereitungsformen in Abhängigkeit vom Verbrennungsluftdurchsatz, **Bild 9**.

Mit zunehmendem Verbrennungsluftdurchsatz, über Schornsteinzug oder bei größerem Umsatz über Gebläse zugeführt, steigt der Umsatz in den dargestellten Feldern für die einzelnen Aufbereitungsarten. Ist der Verbrennungsluftdurchsatz vorgegeben, so steigt mit abnehmender Schütt- bzw. Aggregatdichte der Energieumsatz.



**Bild 8.** Abbrand in Abhängigkeit vom Brennstoffumsatz bei der Verbrennung von Strohbricketts.

Schüttdichte  $500 \text{ kg/m}^3$   
Haufwerkshöhe  $0,16 \text{ m}$   
Feuchtegehalt  $0,06$



**Bild 9.** Mittlerer Abbrand in Abhängigkeit vom Verbrennungsluftdurchsatz bei Stroh verschiedener Aufbereitungsform.

Einwaage  $m_{Bo} \approx 23 \text{ kg}$  Schüttdichte:  
Feuchtegehalt  $0,06-0,08$   $\rho_{\text{Häcksel}} \approx 50 \text{ kg/m}^3$   
Verbrennungsluft  $400 \text{ m}^3/\text{h}$   $\rho_{\text{HD-Ballen}} \approx 80 \text{ kg/m}^3$   
 $\rho_{\text{Brickett}} \approx 500 \text{ kg/m}^3$

## 4. Zusammenfassung und Folgerungen

Die bisher dargelegten Ergebnisse zeigen, daß in der gewählten Versuchsanordnung in Form eines Durchbrandofens nur für die hochverdichteten Bricketts eine vollständige und damit umweltfreundliche Verbrennung durchzuführen war.

Wegen der großen reaktionsfähigen Oberfläche setzt bei dem weniger verdichteten Material nach der Zündung eine sehr starke Reaktion ein. Die entstehenden Gase werden nicht vollständig verbrannt und es werden im Abgas hohe Werte des CO-Gehaltes, meist mit Rauchentwicklung verbunden, gemessen.

Um eine vollständige Verbrennung zu erreichen, muß eine ausreichende Verbrennungsluftmenge, evtl. durch eine zusätzliche Zufuhr (Zweitluft), vorhanden sein und das zur Nachverbrennung

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