

Manfred Reuß und Franz Hainzmeier, Freising

Solare Trocknung von Naßschlamm

Die direkte solare Trocknung eröffnet physikalisch und ökonomisch interessante Anwendungen im landwirtschaftlichen und industriellen Bereich. Insbesondere bei Naßschlamm stellt sie eine gute Möglichkeit zur Reduzierung der Masse dar. Das Trockenprodukt bei Gülle oder Klärschlamm weist eine Vielzahl verfahrenstechnischer und umweltrelevanter Vorteile auf. Im durchgeführten Forschungsvorhaben wurden die theoretischen Grundlagen der direkten solaren Trocknung erarbeitet und ein mathematisches Modell entwickelt, das die Simulation des Trocknungsprozesses ermöglicht. Die Modellierung wurde mit Meßwerten einer Versuchsanlage überprüft, sie beschreibt den Trocknungsprozeß sehr gut. Wegen der großen Effizienz und Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten wäre das Verfahren der direkten Solartrocknung für eine große Verbreitung geeignet.

Die solare Trocknung landwirtschaftlicher und industrieller Produkte stellt eine wichtige Anwendung solarer Energienutzung dar. Beispielhaft für die Trocknung von Dünnschlamm wird die solare Gülle- und Klärschlamm-trocknung untersucht. Da diese Produkte ganzjährig anfallen, entsorgt und/oder weiterverwendet werden müssen, erhält man für die Solartrocknung einen langen Einsatzzeitraum, was sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt.

Die Trockenprodukte weisen in ihrer weiteren Behandlung eine Reihe verfahrenstechnischer Vorteile auf, wie etwa einfache und kostengünstige Lagerung, Transport und Verwertung sowie die erhebliche Mengenreduzierung.

Bei der Trocknung auftretender Schadstoffanfall kann durch Filterung der Abluft gezielt und definiert behandelt werden.

Dipl. Phys. Manfred Reuß und Dipl.-Ing. FH Franz Hainzmeier sind an der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik Weißenstephan, Technische Universität München, Vöttinger Str. 36, 85354 Freising, tätig (Leitung: Prof. Dr. Dr. h.c. Hans Schön). Dieses Vorhaben wurde als Teil eines BMBF Verbundforschungsprojektes (siehe [2]) in Zusammenarbeit mit der Agrartechnik Bornim durchgeführt. Wir danken dem Bundesministerium für Bildung, Forschung und Technologie für die Finanzierung der durchgeführten Forschungsarbeiten.

Die Verwertung von getrockneter Gülle oder Klärschlamm hat damit gegenüber den flüssigen Materialien erhebliche Umweltvorteile in den Bereichen Luftreinhaltung, Gewässer- und Bodenschutz.

Dieses Verfahren wurde in den Jahren 1983 bis 1987 in Japan entwickelt [1] und in einem Forschungsvorhaben genau untersucht. Es hat dort inzwischen eine große Verbreitung im Bereich der Gülletrocknung und anderer landwirtschaftlicher Produkte (Reis) gefunden. In Europa gibt es eine Reihe von Aktivitäten zur Schlammtrocknung, insbesondere von Klärschlamm.

Physikalisches Prinzip der direkten solaren Schlammtrocknung

Für dunkle Naßschlamm wie Gülle oder Klärschlamm eignet sich das Prinzip der „direkten solaren Trocknung“. Dabei wird die zur Verdampfung des Wassers erforderliche Energie (Solarenergie) durch Strahlung an das Produkt übertragen, dort absorbiert und in Wärme umgewandelt. Durch diese Energiezufuhr wird Wasser verdunstet und an die Umgebung abgegeben. Dieser Weg der direkten Energieübertragung macht dieses Verfahren effizienter als indirekte Trocknungsprozesse (etwa Konvektionstrocknung).

Der Systemaufbau sieht dabei wie folgt aus (Bild 1): Der Naßschlamm (typisch: 95 % Wassergehalt) wird in einer dünnen Schicht in ein Trocknungsbecken gefüllt. Die Becken sind mit einer transparenten Abdeckung versehen, die den Prozeß vor Witterungseinflüssen (Regen) schützt. Hier bieten sich gängige Gewächshäuser an. Über das Trocknungsbecken fährt ein automatisch gesteuertes Rührwerk, das für eine vertikale Durchmischung des Naßschlammes sorgt. Es verhindert die Bildung einer Haut oder Schwimmschicht, die den Stofftransport durch die Oberfläche reduzieren würde, und transportiert das Trocknungsprodukt langsam durch das Becken. Der Prozeß wird semikontinuierlich gefahren, auf einer Seite wird also nasses Material eingefüllt (etwa einmal täglich), langsam durch den Trockner transportiert (typische Verweilzeit zehn bis 20 Tage) und dabei getrocknet, am anderen Ende steht trockenes Material an. Eine ebenfalls automatisch gesteuerte Zwangsbelüftung sorgt für den Abtransport der feuchten Luft über dem

Verwendete Formelzeichen:

- $\dot{m}_{A,S}$ = Stoffstrom an der Trocknungsfläche in jedem Segment [kg/m²s]
- β = Stoffübergangskoeffizient [m/s]
- R = Gaskonstante [J/kg K]
- T_L = Temperatur der Luft [K]
- $p_{D,O}$ = Partialdampfdruck an der Oberfläche [Pa]
- $p_{D,L}$ = Partialdampfdruck der Luft [Pa]
- $\dot{Q}_{G,kap}$ = Änderung der inneren Energie des Schlammes [kJ/s]
- α_G = Absorptionskoeffizient des Schlammes [-]
- A_S = Fläche des Segmentes [m²]
- I_b = auf die Schlammoberfläche fallende Strahlung [kJ/m²s]
- \dot{Q}_{lat} = latenter Energiestrom zwischen Schlamm und Luftstrom [kJ/s]
- \dot{Q}_k = konvektiver Energiestrom zwischen Schlamm und Luftstrom [kJ/s]
- $\dot{Q}_{str,B}$ = langwelliger Strahlungsstrom zwischen Schlamm und Luftstrom [kJ/s]
- $\dot{Q}_{G,B}$ = Energiestrom vom Schlamm in den Boden (Konvektion und Leistung) [kJ/s]
- $\dot{Q}_{L,kap}$ = Änderung der inneren Energie der Luft [kJ/s]
- $\dot{Q}_{seit,k}$ = konvektiver Wärmestrom des Randstreifens im Gewächshaus [kJ/s]
- $\dot{Q}_{k,v}$ = konvektiver Verlustenergiestrom zwischen Luftstrom und Umgebung [kJ/s]
- \dot{Q}_{vent} = thermische Leistung der Lüfter [kJ/s]
- $\dot{Q}_{Rühr}$ = thermische Leistung des Rührwerkes [kJ/s]

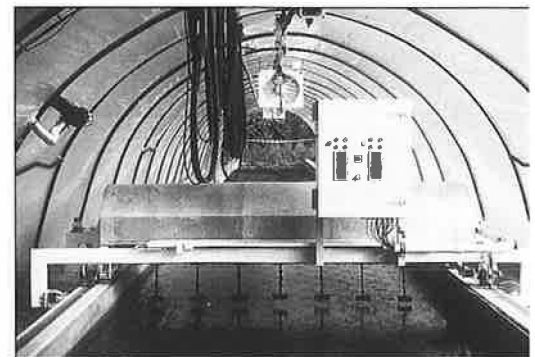


Bild 1: Foto der Versuchsanlage zur solaren Trocknung von Naßschlamm

Fig. 1: Picture of the experimental solar drying plant for sludge

Trocknungsbecken. Werden bei der Trocknung Schadstoffe emittiert, so ist die Abluft über ein entsprechendes Filter zu reinigen. Für den Prozeß wurde ein mathematisches Modell entwickelt, das eine Simulation des instationären Trocknungsverlaufs von Naßschlamm erlaubt.

Dazu wurde der Trocknungstunnel in Längsrichtung in n Segmente eingeteilt. Der Stoffstrom in jedem Segment wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$\dot{m}_{A,S} = \frac{\beta}{RT_L} (p_{D,O} - p_{D,L})$$

Die Leistungsbilanz des Schlammes zeigt die folgende Gleichung:

$$\dot{Q}_{G,kap} = \lambda_G A_S I_B - \dot{Q}_{lat} - \dot{Q}_k - \dot{Q}_{str,B} - \dot{Q}_{G,B}$$

Für den Luftstrom ergibt sich folgende Leistungsbilanz:

$$\dot{Q}_{L,kap} = \dot{Q}_{lat} + \dot{Q}_k + \dot{Q}_{scit,k} - \dot{Q}_{k,v} + \dot{Q}_{vent} + \dot{Q}_{Rühr}$$

Eine detaillierte Beschreibung des Modells findet sich in [2]. Dieses System von Differentialgleichungen wurde numerisch nach der Methode der finiten Elemente gelöst. Eine Überprüfung des Simulationsmodells erfolgte mit Meßwerten einer Versuchsanlage im Technikumsmaßstab. Es bestand eine gute Übereinstimmung. Die Abweichungen von Modell und Messungen liegen unter $\pm 10\%$.

Durchführung von Trocknungsexperimenten

Für die experimentelle Untersuchung des Trocknungsprozesses wurde eine Versuchsanlage errichtet. Das Trocknungsbecken ist 2,40 m breit und 40 m lang. Becken und Rührwerk sind durch ein Folientunnelgewächshaus überbaut. Zwei Ventilatoren sorgen für den erforderlichen Luftwechsel und den Abtransport des verdampften Wassers.

Zur Aufstellung der Energiebilanzen werden Globalstrahlung, Umgebungstemperatur und -feuchte sowie Windrichtung und -geschwindigkeit als meteorologische Größen gemessen. Erfasst werden im Trocknungstunnel die Lufttemperatur am Eingang, in der Mitte und am Ausgang, die Luftgeschwindigkeit am Ein- und Ausgang und die Luftfeuchte am Ausgang. Zusätzlich werden die Laufzeiten der Ventilatoren und des Rührwerkes registriert. Je nach Witterung und Betriebsweise wurde täglich oder in größerem Zeitabstand Frischschlamm mit durchschnittlich 95 % Wassergehalt eingefüllt. Die Fahrgeschwindigkeit des Rührwerkes betrug etwa 2 m/min. Nach

jedem Durchlauf wurde ebenfalls in Abhängigkeit von Witterung und Jahreszeit eine Pause von 5 bis 60 min für das Rührwerk eingehalten. Die Ventilatoren liefen rund 2 min (einfacher Luftwechsel). Die Pausenzeiten für die Ventilatoren lagen zwischen zwei und 30 Minuten.

Fahr- und Umdrehungsgeschwindigkeit des Rührwerkes haben erheblichen Einfluß auf den Materialtransport im Trocknungsbecken und auf die Wasserentzugsrate. In Vorversuchen wurde eine geeignete Kombination der beiden Parameter ermittelt. Zu niedrige Werte führten zur Bildung einer Haut, die den Stofftransport durch die Oberfläche behinderte. Bei zu hohen Werten wurde nasses Material durch das Becken in den Teil mit bereits trockenem Material verschleppt und dieses wieder befeuchtet, so daß die angestrebte Endfeuchte von 20 bis 30 % nicht erreicht werden konnte.

Ergebnisse und Diskussion

Einen beispielhaften Feuchteverlauf im Becken bei der Trocknung von Rindergülle zeigt *Bild 2*. Im ersten Drittel stellt sich eine Feuchte zwischen 93 und 91 % ein, die im zweiten Drittel auf etwa 80 % abnimmt. Im letzten Drittel fällt der Wassergehalt von 80 % auf 20 % bei der Entnahmestelle. Dies zeigt, daß bei guten Witterungsverhältnissen niedrige Endfeuchten des Trocknungsproduktes erreichbar sind. Die Trocknung von einem Anfangswassergehalt von 95 % auf einen Endzustand von 20 % bedeutet eine erhebliche Reduzierung der Anfangsmasse auf nur noch 6 % oder 1/16.

Die Verdampfungsenthalpie im relevanten Temperaturbereich liegt bei etwa 0,68 kWh/kg-H₂O, bei idealen Bedingungen könnten an einem schönen Sommertag mit 8 kWh/m²d also knapp 12 kg Wasser verdampft werden (ideal heißt, die gesamte Strahlungsenergie wird zur Verdampfung von Wasser eingesetzt). Ein

Beispiel der an der Versuchsanlage gemessenen Wasserentzugsmengen bei der Trocknung von Rindergülle in den Sommermonaten zeigt *Bild 3*. Hier werden bis zu 6 kg H₂O/m²d entzogen. Dies bedeutet einen energetischen Systemwirkungsgrad von 50 %. Im Frühjahr und Herbst gehen die Verdampfungsraten etwas zurück, da weniger Strahlung zur Verfügung steht, die Umgebungstemperaturen sind niedriger und bei der damit verbundenen höheren Luftfeuchte das Sättigungsdefizit sinkt. Bei längeren Frostperioden im Winter muß die Anlage stillgelegt werden, da das nasse Material einfriert und eine Beschädigung des Rührwerkes zu befürchten ist.

Berücksichtigt man die Strahlungsverhältnisse in Deutschland mit etwa 750 bis 830 kWh/m²a solarer Strahlungsenergie auf eine Horizontalfäche, so kann man mit einer Wasserentzugsmenge von etwa 450 bis 550 kg/m²a rechnen. Wegen der niedrigen Energiedichte der Solarstrahlung und dem hohen Energiebedarf für die Verdampfung des Wassers besteht ein relativ großer Flächenbedarf für die Trocknungsanlage. Daran ist aus physikalischen Gründen nichts zu ändern.

Literaturhinweise sind vom Verlag unter LT 98 126 erhältlich.

Schlüsselwörter

Direkte Solartrocknung, Schlamm-trocknung

Keywords

Direct solar drying, drying of sludge

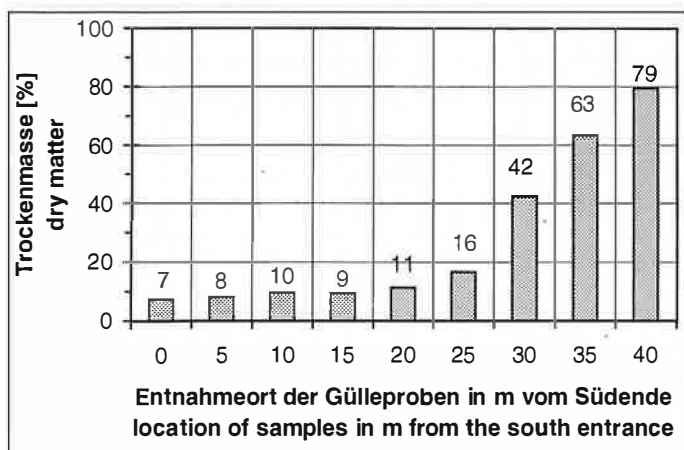


Bild 2: Feuchteverlauf im Trocknungsbecken bei Rindergülle

Fig. 2: Moisture distribution in the drier basin for cattle manure

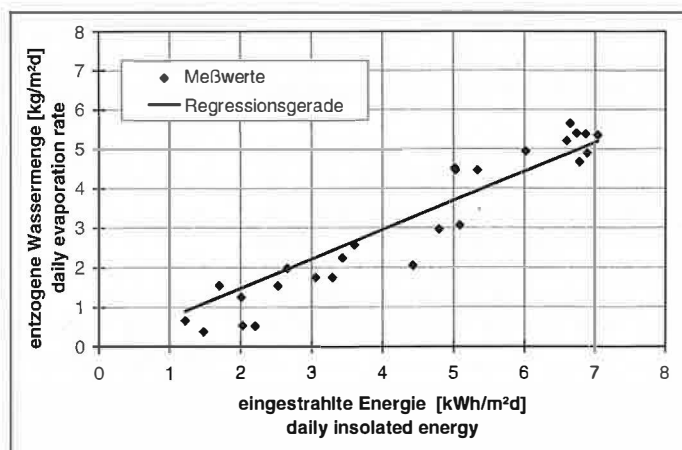


Bild 3: Täglicher Wasserentzug im Sommer (August) für Rindergülle

Fig. 3: Daily evaporation rate in summer (August) for cattle manure