

## Wärmeentzug bei der Kompostierung von Schnittholz

FRANK SCHUCHARDT

Institut für Technologie

### Inhalt

#### Einleitung

- 1 Beschreibung der Anlage und Betriebsweise
- 2 Versuchsergebnisse
- 3 Bewertung der Ergebnisse

#### Zusammenfassung

#### Literatur

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit wurden in einem durch das Niedersächsische Energie-Aktions-Programm von 1980 geförderten Pilotvorhaben (Energiegewinnung aus Buschholzkompost zur Gewächshausbeheizung) in dem Gartenbaubetrieb von A. und A. Schuldt in Alteburg bei Aerzen gewonnen. In dem Betrieb wird im biologischen Anbau Gemüse produziert, was zum einen erhebliche Mengen an Kompost und Mulch erfordert und zum anderen in den Monaten Februar und März ein beheiztes Gewächshaus für die Jungpflanzenaufzucht. Angeregt durch die Schriften von Jean Pain (o. J.) wurde eine Miete aus Schnittholz-häcksel erstellt und deren Kompostierungswärme entzogen. Das Institut für Technologie hatte dabei die im Rahmen des Förderprogrammes vorgesehene fachliche Begleitung des Vorhabens übernommen.

#### Einleitung

In Parkanlagen, Friedhöfen, Gärten, Obstplantagen und an Straßenrändern fallen jährlich große Mengen Schnittholz an, die vielfach als Abfall betrachtet und mit erheblichen Kosten beseitigt werden. Im Obstbau wird bei Kernobst jährlich mit 20 bis 40 dt/ha und bei Steinobst mit etwa 13 dt/ha gerechnet (Kramer et al., 1982). Hier ist noch am ehesten eine Verwertung des Schnittholzes an Ort und Stelle als Mulch möglich, zumal eine Anzahl von geeigneten Zerkleinerungsmaschinen zur Verfügung steht. Über den Schnittholzfall an den übrigen genannten Orten sind zu meist keine allgemein gültigen Angaben möglich (Theuner, 1983). Auf der 403 ha großen Friedhofsfläche Hamburgs fallen z. B. jährlich etwa 20 000 m<sup>3</sup> Buschwerk an (Lohfeld, 1980). Gartenbauämter (z. B. in Stuttgart) zerkleinern einen Teil des anfallenden Schnittholzes in Parkanlagen mit fahrbaren Häckslern, um es als Mulch zu verwerten (Theuner, 1983). Damit kann nicht nur eine Austrocknung des Bodens verhindert werden, es wird organische Substanz zugeführt und der Aufwuchs an Unkraut unterdrückt, was den Einsatz von Herbiziden erübrigt.

Der hohe Gehalt an organischer Substanz von über 90 % und das Vorhandensein von Pflanzennährstoffen legen eine Kompostierung des Schnittholzes nahe; unter natürlichen Verhältnissen des Waldes geschieht nichts anderes. Nachteilig für eine schnelle und spontane Kompostierung ist das relativ weite C/N-Verhältnis von 50 bis 80 und die sperrige Struktur. Mit gehäckseltem und mit Stickstoff (2 kg Harnstoff/m<sup>3</sup> Häckselgut) aufgewertetem Schnittholz erhielten Fischer und Rannertshäuser (1982) nach sieben Monaten Rottezeit einen gebrauchsfertigen Kompost, in dem ähnliche Wuchsleistungen wie im Torf möglich sind.

Bei der Kompostierung in genügend großen Haufwerken können durch Wärmestau Temperaturen bis zu 75 °C entstehen. Der Franzose Pain versuchte als erster, diese Wärme zu nutzen, indem er Wärmetauscher in das rottende Häckselgut einlegte und an ein Gewächshaus bzw. an die Heizung und Warmwasserversorgung anschloß (Pain, o. J.). Im Prinzip ähnliche Versuche wurden an anderen Stellen mit Festmist bzw. Traubentrestern durchgeführt (Kessel, 1978; Schuchardt, 1982; Schuchardt, 1983; Schulz et al., 1982; Thostrup und Berthelsen, 1983; Graefe, 1983). Pain konnte nach eigenen Angaben aus einer Schnittholzmiere von 75 m<sup>3</sup> (50 t bei 40 bis 50 % Wassergehalt) während sechs Monaten stündlich vier Liter Wasser von 10 auf 60 °C erwärmen. Das entspricht einem Wärmeentzug von 1203 kWh/t bzw. 802 kWh/m<sup>3</sup> entsprechend einer mittleren Leistung von 0,278 kW/t bzw. 0,186 kW/m<sup>3</sup>. Wird ein Brennwert für das trockene Holz von 5 kWh/kg zugrunde gelegt, ergibt sich ein Wärmeentzug von 48 % des Brennwertes innerhalb von sechs Monaten Rottezeit. Nach 18 Monaten Kompostierung soll das Material für die Anwendung in der Landwirtschaft gebrauchsfertig sein. An den Zahlenangaben von Pain über den Wärmeentzug bestehen Zweifel, da weder eine Rücklauf-temperatur von 10 °C noch eine Vorlauf-temperatur von 60 °C während der gesamten sechs Monate angenommen werden können. Daß diese Erwärmung kurzzeitig während der Heißrottephase möglich ist, bleibt unbezweifelt.

An verschiedenen Orten in Frankreich und Belgien wurden Versuche zum Wärmeentzug aus Schnittholz-Häcksel durchgeführt. Es sind jedoch von dort keine exakten Messungen bekanntgeworden.

Für eine 80 m<sup>3</sup> große Miete aus Schnittholz in Berlin-West gibt Bramigk (1983) eine Leistung von 2 bis 5 kWh entsprechend 0,025 bis 0,063 kW/m<sup>3</sup> während acht Monaten an. Die Vorlauf-temperaturen lagen zwischen 40 und 50 °C bei einem Wasserstrom von 100 bis 150 l/h. Als Wärmetauscher dienten Polypropylen-Rohre, Kunststoff-Flachwärmetauscher und Gußmetall-Heizkörper.

Aus einer 180 m<sup>3</sup> großen Schnittholz-häcksel-Miete (120 m<sup>2</sup> Grundfläche; 1,5 m Höhe) in Witzworth (Nordfriesland) konnten nach Eggersglüss (1984) im Zeitraum von April 1983 bis zum März 1984 während neun Monaten 5804 kWh (32 kWh/m<sup>3</sup>) entzogen werden. Dabei verbrauchten die zwei installierten Umwälzpumpen 622 kWh. Die Vorlauftemperaturen lagen bei 30 °C bei Guttemperaturen um 40 °C und ließen sich auch durch Absenken der Wasserumwälzmenge (150 bis 250 l/h) nur wenig erhöhen. Nach 10 Monaten Rottezeit war die Wärmeproduktion zu Ende. Bessere Ergebnisse erwartet Eggersglüss durch kompakte Mieten mit größerer Höhe, (durch geringere Wärmeabstrahlung). Abdeckung der Miete zur Hauptwindrichtung, größere Wärmetauscherflächen (bisher 0,097 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>), Stapeldurchströmung von unten nach oben (bisher durch in Längsrichtung spiralförmig eingelegte Rohre) und größere Rohrdurchmesser (bisher 19 bzw. 22 mm). Eine Befeuchtung des frischen Häckselns ist nach Ansicht von Eggersglüss nicht notwendig, da die Mietentemperaturen auch so innerhalb weniger Tage auf 50 °C ansteigen, wohl aber eine Befeuchtung während der Rottezeit.

### 1 Beschreibung der Anlage und Betriebsweise

In der Zeit von Dezember 1982 bis Mitte März 1983 wurde das Schnittholz je nach Anfall bzw. Anlieferung zerkleinert und zur Miete aufgesetzt. Das Schnittholz stammte von Park- und Straßenbäumen bzw. -sträuchern, daneben fiel in der Umgebung des Betriebes an verschiedenen Stellen Astmaterial, auch durch gefällte Bäume, an. Folgende Baum- und Straucharten waren vertreten: Pappel, Linde, Esche, Akazie, Weide, Hainbuche, Rotbuche, Weißdorn, Apfel, Rosen und diverse Ziersträucher. Bei allem Material handelte es sich um „lebendes“ Holz mit grüner Rinde und Knospen. Die Zerkleinerung erfolgte mit einem über Zapfwelle betriebenen Trommelhacker (Berkili, Typ ZB-Z) mit Handbeschickung durch eine Arbeitskraft, wobei der 26 kW-Schlepper bei Ästen mit einem Durchmesser von über 18 cm und stumpfen Messern zeitweilig die Rauchgrenze erreichte. Der Durchsatz lag bei etwa 1 m<sup>3</sup> Häckselgut je Stunde, entsprechend etwa 270 kg mit einem Trockensubstanzgehalt

von 65 %, konnte aber bei geschärften Messern und leicht greifbaren, nicht ineinander verhakten Ästen bis auf 2 m<sup>3</sup> (540 kg) ansteigen. Bei Außentemperaturen unter dem Gefrierpunkt reichte die Schlepperleistung zur Zerkleinerung der gefrorenen, stärkeren Äste nicht aus. Vom Hacker wurde das Häckselgut auf einen daneben stehenden Hänger gelassen, mit dem Schlepper zur Miete gefahren und von Hand abgeladen. Die Miete liegt unmittelbar neben dem Gewächshaus mit einer Grundfläche von 110 m<sup>2</sup>. Der Verbrauch an Dieseltreibstoff lag bei etwa 3,5 l/h, d. h. bei einem mittleren Durchsatz von 1,5 m<sup>3</sup> Häckselgut bei 2,33 l/m<sup>3</sup>.

Die Abbildung 1 zeigt das frisch zerkleinerte Schnittholz; wie aus der Sieblinie für das getrocknete Gut in Abbildung 3 hervorgeht, haben 65 % der Gesamtprobe eine Teilchenlänge von 4 bis 32 mm, entsprechend einem Sieblochdurchmesser von 2 bis 16 mm. Bei etwa 30 % beträgt die Teilchenlänge über 32 mm, wobei einzelne dünne Äste über 300 mm lang sein können. Die Bestimmung der Teilchenlänge erfolgte nach der von Bosma und Dervedde (1979) beschriebenen Methode mit einem Schwingsieb. Die Zerkleinerungsintensität des Schnittholzes ist aus zwei Gründen von besonderer Bedeutung für den mikrobiellen Abbauprozess und damit für die Wärmeezeugung. Je intensiver zerkleinert und

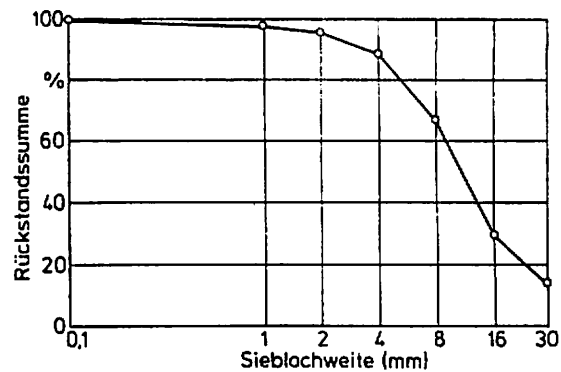


Abb. 3: Sieblinie des frischen Schnittholz-Häckselns



Abb. 1: Schnittholz-Häcksel frisch

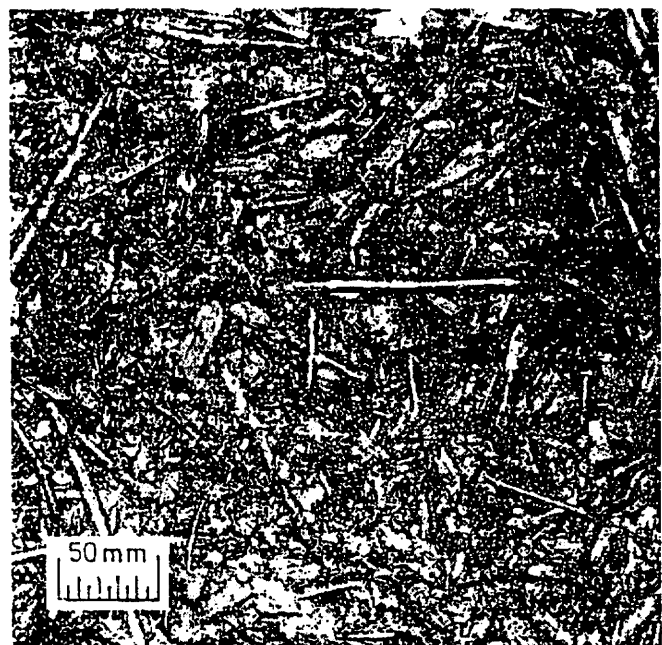


Abb. 2: Schnittholz-Häcksel nach 20 Monaten Rotte

vor allem zerfasert die Aststücken sind, desto größer ist die Angriffsfläche für die Mikroorganismen. Andererseits muß die innere Struktur der Miete einen ausreichenden Gasaustausch gewährleisten, d. h. der für die Atmung der Mikroorganismen notwendige Luft-Sauerstoff muß heran- und das entstehende Kohlendioxid abgeführt werden. Das ist bei größeren Schütthöhen (über 1 m) nur dann gewährleistet, wenn auch größere, sperrige Aststücken im Häckselgut enthalten sind.

Nachdem das gehäckselte Gut auf der Miete verteilt worden war, wurde es mit einem Regner bzw. Bewässerungsrohren befeuchtet, damit es sich mit Wasser sättigt. Dabei konnte beobachtet werden, daß nach einigen Stunden Wasser am Boden der Miete herauslief. Die anfängliche Vorgehensweise, das Gut erst auf einer Plastikfolie zu wässern und dann zur Miete aufzusetzen, wurde bald aus praktischen Gründen fallengelassen, da der Handarbeitsaufwand zu groß war. Der Feuchtegehalt des bewässerten Materials lag bei 50%, das Luftporenvolumen in der Miete bei etwa 70%, was nach den Erfahrungen bei der Kompostierung als ausreichend betrachtet werden kann.

Nach Fertigstellung der Miete betrug deren Grundfläche 6,5 x 14,5 m, wobei der untere Teil bis zu einer Höhe von 0,6 m seitlich durch Betonwände begrenzt ist, und die Plattformfläche 3,5 x 11,5 m, Abbildungen 4 und 5. Die mittlere Höhe der Miete lag bei 2,7 m; bedingt durch das Gefälle des Untergrundes betrug die Höhe im vorderen Teil der Miete 2,9 m und im hinteren Teil 2,5 m. Das Gesamtvolumen der Miete betrug etwa 197 m<sup>3</sup> mit einer Schüttdichte von 350 kg/m<sup>3</sup>. Daraus errechnet sich eine Gesamtmasse von 69 t Frischmasse, entsprechend 34,5 t Trockenmasse bzw. 33,4 t organische Trockenmasse.

Mit Zunahme der Mietenhöhe wurden, beginnend bei 0,6 m über dem Erdniveau, alle 0,22 m Wärmetauscherrohre eingelegt (Abb. 4 und 5). Diese Wärmetauscherrohre bestehen aus schwarzem, flexiblem Polyäthylenrohr (PE-glatt, ND/o hart, 3/4") mit einem Außendurchmesser von 26 mm und einer Wandstärke von 2,7 mm. Während die unterste Lage eine Länge von 150 m hat, beträgt sie bei den übrigen acht Lagen 300 m; in dieser Länge werden die Rohre im Handel angeboten. Die jeweiligen Lagen wurden, so wie in Abbildung 5 dargestellt, mäandrierend verlegt und an die senkrecht vor der Miete stehenden Sammelrohre angeschlossen. Über Handventile kann jede einzelne Lage zu- bzw. abgeschaltet werden. Um ein Temperaturgefälle innerhalb der Miete von einer Seite zur anderen zu vermeiden, wurden die Anschlüsse an die Sammelrohre mit jeder Lage gewechselt, so daß kühleres Rücklaufwasser einmal an der rechten und einmal an der linken Mietenseite zulief. Bedingt durch den Böschungswinkel verringerte sich der Abstand der Röhren innerhalb einer Lage zur Oberkante der Miete hin zunehmend.

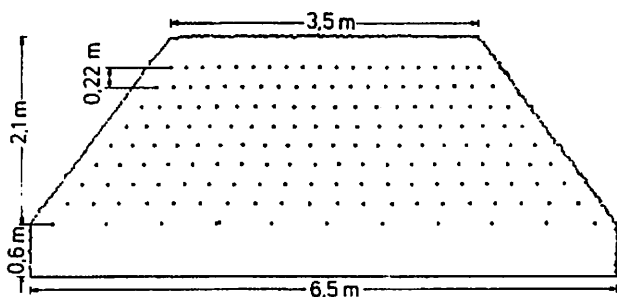


Abb. 4: Querschnitt durch die Miete mit den Wärmetauscherrohren

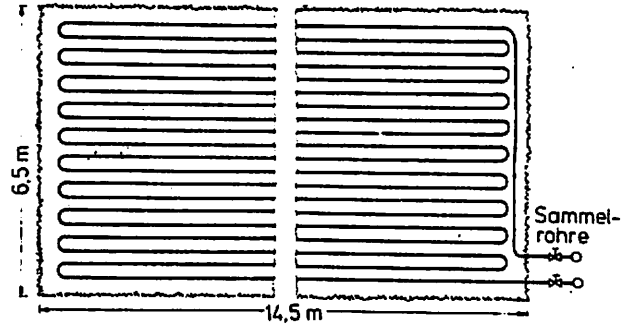


Abb. 5: Längsschnitt durch die Miete in Höhe der untersten Lage Wärmetauscherrohre

Die Gesamtlänge der Wärmetauscherrohre beträgt 2550 m, die Oberfläche 208 m<sup>2</sup> und das Wasservolumen 0,849 m<sup>3</sup>. Daraus ergibt sich, bezogen auf das Gesamtmietenvolumen von 197 m<sup>3</sup>, eine Tauscherlänge von 12,95 m/m<sup>3</sup> und eine Tauscherfläche von 1,06 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>; bezogen auf den oberen Teil der Miete von 139 m<sup>3</sup>, der mit den Tauscherrohren bestückt ist, beträgt die Tauscherlänge 18,35 m/m<sup>3</sup> und die Tauscherfläche 1,50 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.

Mit einer gewöhnlichen Heizungs-Umwälzpumpe (a) mit einem Anschlußwert von 50 W wird das erwärmte Wasser aus der Miete in das Heizsystem des Gewächshauses 1 und im Kreislauf wieder zurück in die Miete gepumpt (Abb. 6). Die Förderleistung der Pumpe lag bei 1,4 m<sup>3</sup>/h, der Leitungsdruck zwischen 1,0 und 1,5 bar. Über eine Wärmemengen-Meßeinrichtung (c), die aus einem Volumendurchflußmesser mit Impulsgeber (b) und zwei Temperaturmeßstellen im Vor- ( $\vartheta_V$ ) bzw. Rücklauf ( $\vartheta_R$ ) besteht, wird der Volumenstrom und die entzogene Wärmemenge registriert. Ein Betriebsstundenzähler (d) erfaßt die Einschaltzeiten der Umwälzpumpe, die über ein Kontakt-Thermometer ( $\vartheta_{G1}$ ) im Gewächshaus 1 bei Erreichen einer vorgewählten Temperatur ein- bzw. ausgeschaltet wird. Mietenthermometer messen

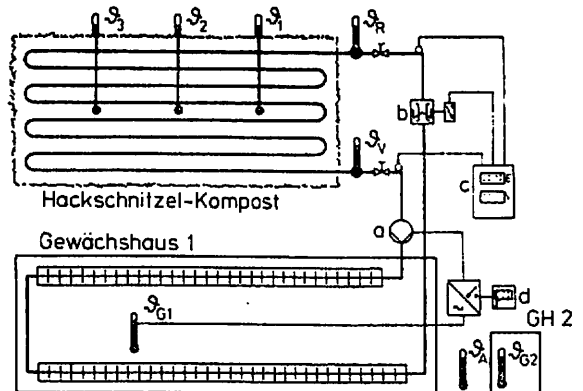


Abb. 6: Versuchsanordnung

- a Umwälzpumpe
- b Volumendurchflußmesser mit Impulsgeber
- c Wärmemengen-Meßeinrichtung
- d Betriebsstundenzähler und Kontaktgeber
- $\vartheta_1$  Mietentemperatur Meßstelle 1
- $\vartheta_2$  Mietentemperatur Meßstelle 2
- $\vartheta_3$  Mietentemperatur Meßstelle 3
- $\vartheta_V$  Vorlauftemperatur
- $\vartheta_R$  Rücklauftemperatur
- $\vartheta_{G1}$  Gewächshausatemperatur, beheizt
- $\vartheta_{G2}$  Gewächshausatemperatur, unbeheizt
- $\vartheta_A$  Außentemperatur
- GH 2 Gewächshaus 2, unbeheizt

die Temperaturen an drei Stellen im Zentrum der Miete, wobei an der Meßstelle  $\vartheta_1$  die Mietenhöhe 2,9 m beträgt, bei  $\vartheta_2$  2,7 m und bei  $\vartheta_3$  2,5 m. Daneben können die Temperaturen im Vorlauf ( $\vartheta_V$ ), Rücklauf ( $\vartheta_R$ ), der Außenluft ( $\vartheta_A$ ) und der Gewächshäuser 1 ( $\vartheta_{G1}$ ) und 2 ( $\vartheta_{G2}$ ) abgelesen werden. Täglich ein bis zwei Mal wurden die Meßdaten protokolliert.

Während vier Perioden mit einer Zeitdauer von insgesamt 240 Tagen wurde der Miete Wärme entzogen. In den Perioden 1, 2 und 3 wurde ausschließlich das Gewächshaus beheizt; in der Periode 4 außerdem das Wohnhaus und das Brauchwasser. Nach 100 Tagen Rottezeit (Mitte Mai 1983) konnte das Wärmeangebot nicht mehr voll genutzt werden, da die oberen 6 Lagen Wärmetauscherrohre undicht waren. Zum Ende der Periode 4 waren auch die übrigen drei Lagen undicht geworden, so daß der Wärmeentzug total eingestellt werden mußte.

## 2 Versuchsergebnisse

In Abbildung 7 ist der Verlauf der Temperaturen in der Miete, der Außenluft und des Vorlaufs während eines Jahres dargestellt, wobei die Mietentemperaturen erst ab Mitte März 1983 erfaßt werden konnten.

Ein Einfluß der Außentemperaturen auf die Mietentemperaturen ist nicht zu erkennen, während der der des Wärmeentzuges deutlich ist. Ein Temperaturgradient in Längsrichtung der Miete trat erst nach einigen Monaten Rottezeit stärker hervor. An der Meßstelle 1 mit einer ursprünglichen Mietenhöhe von 2,9 m lagen die Temperaturen höher als an der Meßstelle 3 mit einer ursprünglichen Mietenhöhe von 2,5 m. Die Temperaturen an der Meßstelle 2 (Mietenhöhe 2,7 m) lagen durchweg zwischen denen der Meßstellen 1 und 3. Beim Abschalten des Wärmeentzuges glichen sich die Temperaturen in der Miete wieder an. Daneben wurden Temperaturunterschiede bis zu 12 K im Querprofil der

Miete gemessen, die nicht eindeutig erklärt werden können. Unterschiede in der Struktur und dem Wassergehalt des Substrates könnten dafür verantwortlich sein.

Während der Entzugsperiode 1, die detailliert in Abbildung 8 dargestellt ist, lagen die Vorlauftemperaturen in den ersten drei Wochen mit nur 15 bis 25 °C sehr niedrig, was auf Temperaturen in der Miete von unter 40 °C schließen läßt. Die Ursachen für diese niedrigen Temperaturen dürften in dem frühzeitigen Wärmeentzug aus der noch anwachsenden und nur gering erhitzten Miete zu suchen sein. Erst nach 35 Tagen hatte die Miete ihre Endgröße erreicht und die Vorlauftemperaturen einen über fast 40 Tage relativ konstanten Wert von 30 °C. Die Mietentemperaturen fielen in dieser Zeit auf 30 °C ab, konnten aber nach dem Abschalten des Wärmeentzuges innerhalb von drei Tagen fast 45 °C erreichen. Ein dreitägiger Wärmeentzug während der Periode 2 verzögerte einen weiteren Temperaturanstieg.

Nach dem erneuten Abschalten des Wärmeentzuges stiegen die Temperaturen innerhalb von acht Tagen auf über 72 °C an. Der zweitägige Wärmeentzug der Periode 3 senkte die Temperaturen in der Miete auf 60 bis 65 °C bei einer Vorlauftemperatur zwischen 50 und 60 °C.

Die nachfolgende Ruhephase bis zum Beginn der Periode 4 ließ die Temperaturen im Kompost erneut auf etwa 68 °C ansteigen. Während der nun folgenden mehrmonatigen Periode mit unregelmäßigem Wärmeentzug sanken die Temperaturen in der Miete allmählich, wobei sich die Vorlauftemperatur über drei Monate bei 35 bis 40 °C halten konnte. Ab Oktober stiegen die Temperaturen in der Miete trotz sinkender Außentemperaturen auf 60 bis 65 °C, blieben dort bis Februar 1984, sanken zum Sommer auf etwa 45 °C und lagen im September 1984, also nach 20 Monaten Rottezeit, bei 60 °C.

Die Rücklauftemperaturen lagen etwa 0,5 bis 5 K unter den Vorlauftemperaturen, wobei die höheren Differenzen bei niedrigen Außentemperaturen auftraten.

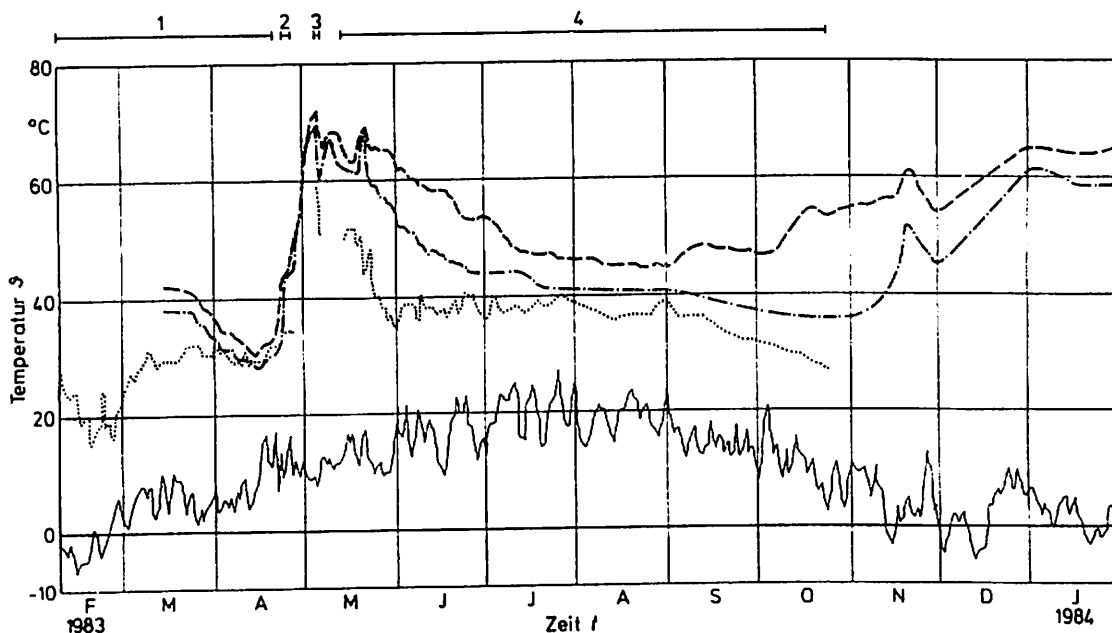


Abb. 7: Temperaturverlauf von Februar 1983 bis Januar 1984

— mittlere Tagestemperatur    - - - Mietentemperatur  $\vartheta_1$     - . - Mietentemperatur  $\vartheta_2$     ..... Vorlauftemperatur  $\vartheta_V$   
Entzugsperioden 1 ... 4 siehe Tabelle 1

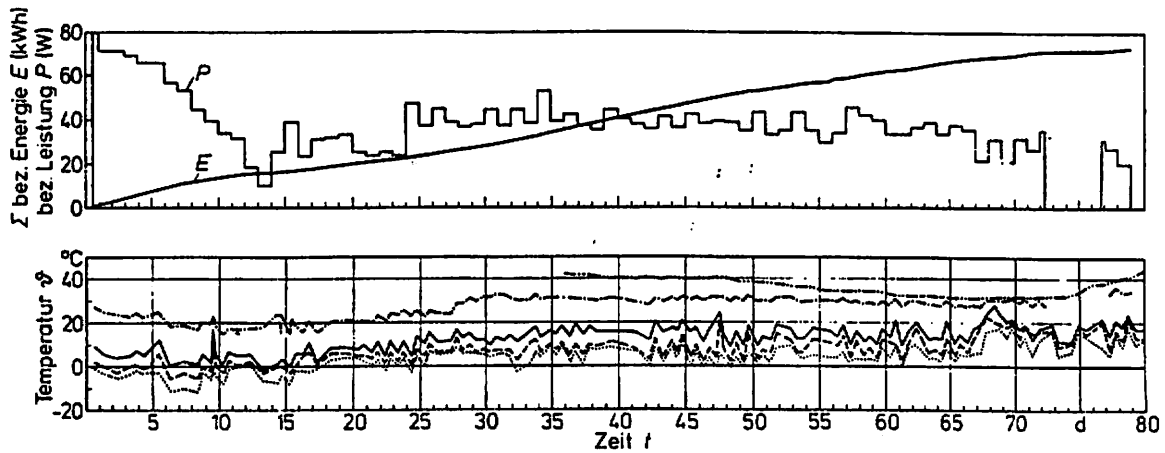


Abb. 8: Ergebnisse während des Wärmeentzuges in den Perioden 1 und 2

oben: Leistung P und Summe der entzogenen Energie E von 1 m<sup>3</sup> Häckselgut

unten: Temperaturverlauf — ϑ<sub>G1</sub> Gewächshaus 1 - - - ϑ<sub>G2</sub> Gewächshaus 2 - - - ϑ<sub>V</sub> Vorlauf  
 - - - ϑ<sub>2</sub> Miete ..... ϑ<sub>A</sub> Außenluft

In den ersten achtzehn Tagen des Wärmeentzuges lagen die gemessenen Außentemperaturen durchweg unter dem Gefrierpunkt (Abb. 8). Das war in dieser Zeit auch zumeist in dem unbeheizten Gewächshaus 2 der Fall, wobei aber durch Sonneneinstrahlung auch Temperaturen über dem Gefrierpunkt auftraten. Dagegen konnte das beheizte Gewächshaus 1 während dieser für die Jungsaaten kritischen Zeit frostfrei gehalten werden, selbst bei Außentemperaturen von -12 °C. Lediglich am 14. Tag, als die Umwälzpumpe für einige Zeit abgeschaltet worden war, sank die Temperatur für kurze Zeit auf -2 °C. In der Entzugsperiode 1 lagen die Temperaturen im beheizten Gewächshaus 1 etwa um 5 bis 10 K über denen des unbeheizten Gewächshauses 2.

Die Leistung der Miete fiel in den ersten 14 Tagen kontinuierlich von 15,8 auf 2 kW (80 bzw. 10 W/m<sup>3</sup>) ab. Daraus wird geschlossen, daß der Wärmeentzug und der Wärmeverlust höher als die Wärmenachlieferung waren, die Miete überlastet wurde. Erst mit der weiteren Zufuhr von gehäckseltem Schnittholz stellte sich bis zum Ende der Entzugsperiode 1 nahezu ein Gleichgewicht zwischen Wärmeentzug und -bildung ein mit einer Leistung der Miete von etwa 7,9 kW (40 W/m<sup>3</sup>). Der Gesamt-Wärmeentzug betrug zum Ende der Periode 1 14 105 kWh (71,6 kWh/m<sup>3</sup>). Der Abfall der Mientemperaturen auf 30 °C, ein Bereich, in dem die Aktivität der Mikroorganismen, damit die Wärmebildung, stark abnimmt, zeigt die Belastung der Miete bis an ihre Grenzen. Die Tabelle 1 gibt eine Übersicht über den Wärmeentzug und die Leistung aller vier Entzugsperioden, wobei die Werte der Periode 4 nicht direkt mit denen der ersten drei Perioden verglichen werden können, da in dieser der Wärme-

entzug diskontinuierlich erfolgte und das Wärmeangebot nicht voll ausgenutzt werden konnte. Die Umwälzpumpe lief 6732 h und verbrauchte in dieser Zeit 336 kWh.

Das Rottegut verfärbte sich innerhalb weniger Wochen dunkelbraun; die ursprüngliche Struktur war nach 20 Monaten aber noch deutlich erkennbar (Abb. 2). Mit dem Erreichen der hohen Rotttemperaturen von 70 °C im Mai 1983 sackte die Miete in kurzer Zeit stark zusammen und riß seitlich auseinander. Analysen des Trockensubstanzgehaltes während der Rotte zeigen sehr große Unterschiede innerhalb der Miete (Tab. 2). Diese sind teilweise dadurch zu erklären, daß durch stark verpilzte Schichten dicht un-

Tabelle 2: Stoffdaten

| Datum   | Tag Nr. | Entnahmetiefe cm | TS-Gehalt % | Wasser-Gehalt % | OTS-Gehalt % | Asche-Gehalt % | pH-Wert |
|---------|---------|------------------|-------------|-----------------|--------------|----------------|---------|
| 8.2.83  | 1       | *1)              | 65          | 35              | 96,8         | 3,2            | 6,9     |
| 7.9.83  | 213     | 0                | 76          | 24              | 96,4         | 3,6            | 6,0     |
|         |         | 20               | 31          | 69              | 96,1         | 3,9            | 6,9     |
|         |         | 40               | 39          | 61              | 94,1         | 5,1            | 6,0     |
| 6.6.84  | 485     | 20               | 22          | 78              | 93,0         | 7,0            | 6,5     |
|         |         | 50               | 18          | 82              | 92,8         | 7,2            | 6,9     |
|         |         | 50               | 78          | 22              | 93,5         | 6,5            | 6,6     |
|         |         | 65               | 18          | 82              | 93,6         | 6,4            | 6,7     |
|         |         | 65               | 26          | 74              | 95,4         | 4,6            | 6,7     |
| 20.9.84 | 591     | *2)              | 22          | 78              | 94,6         | 5,4            | 7,2     |

\*1) Mischprobe aus frisch gehäckseltem Material  
 \*2) Mischprobe aus den oberen 50 cm der Miete

Tabelle 1: Energieentzug und mittlere Leistung

| Periode Nr. | Datum                   | Zeit d | Energieentzug bezogen auf       |                      |             |              | Leistung bezogen auf          |                    |           |            |
|-------------|-------------------------|--------|---------------------------------|----------------------|-------------|--------------|-------------------------------|--------------------|-----------|------------|
|             |                         |        | Miete (197 m <sup>3</sup> ) kWh | 1 m <sup>3</sup> kWh | 1 kg TS kWh | 1 kg OTS kWh | Miete (197 m <sup>3</sup> ) W | 1 m <sup>3</sup> W | 1 kg TS W | 1 kg OTS W |
| 1           | 8. 2. bis 21. 4. 1983   | 73     | 14 105                          | 71,6                 | 0,409       | 0,424        | 8051                          | 41                 | 0,234     | 0,243      |
| 2           | 24. 4. bis 26. 4. 1983  | 3      | 158                             | 0,8                  | 0,005       | 0,005        | 2194                          | 11                 | 0,063     | 0,065      |
| 3           | 6. 5. bis 7. 5. 1983    | 2      | 335                             | 1,7                  | 0,010       | 0,010        | 6979                          | 35                 | 0,200     | 0,207      |
| 4           | 15. 5. bis 24. 10. 1983 | 162    | 7 273                           | 36,9                 | 0,211       | 0,218        | 1871                          | 9                  | 0,051     | 0,053      |
|             | Summe                   | 240    | 21 871                          | 111,0                | 0,635       | 0,657        | -                             | -                  | -         | -          |

ter der Oberfläche der Miete kein Regenwasser eindringen konnte und das Material austrocknete. Es war dann vom Ausgangsmaterial äußerlich nicht zu unterscheiden. Bei einem Wassergehalt von 78 % nach 20 Monaten ließ sich mit der Hand freies Wasser herausdrücken, ohne daß, dem Geruch nach zu urteilen, anaerobe Verhältnisse vorlagen. Die Schüttdichte hatte sich zu diesem Zeitpunkt auf  $0,76 \text{ t/m}^3$  erhöht bei einem Luftporenvolumen von etwa 30 %. Der Gehalt an organischer Masse hatte nur gering abgenommen und lag mit 94,6 % noch immer sehr hoch. Der pH-Wert hatte sich nach einer anfangs leicht sauren Periode bei 7,2 eingestellt. In den kälteren Randzonen der Miete wurden zahlreiche Kompostwürmer beobachtet.

Die mittlere Höhe der Miete hat sich nach 20 Monaten Rottezeit von 2,70 m auf 1,65 m verringert. Dabei hat das Volumen von  $197 \text{ m}^3$  auf  $140 \text{ m}^3$  abgenommen, die Feuchtmasse von 69 auf 106 t zugenommen, die Trockenmasse von 34,5 t auf 23,4 t und die organische Trockenmasse von 33,4 t auf 22,1 t abgenommen. Wird ein Brennwert des trockenen Holzes von 5 kWh/kg zugrunde gelegt, so ergibt sich ein Energieinhalt der Miete zum Beginn von etwa 175 000 kWh ( $875 \text{ kWh/m}^3$ ), der sich um 45 500 kWh auf 129 500 kWh verringerte. Von den während 20 Monaten durch mikrobielle Atmung freigesetzten 45 500 kWh konnten während der acht Monate Entzugszeit 21 871 kWh, entsprechend 48,1 %, entzogen werden.

Beim Abtragen der Miete im September 1984 wurde die Ursache für die undichten Wärmetauscherrohre gefunden. Durch das Absacken und Auseinanderreißen der Miete waren die Rohre an zahlreichen Stellen auseinandergezogen worden (Abb. 9).



Abb. 9: Zerstörtes Wärmetauscherrohr; Außendurchmesser 26 mm

### 3 Bewertung der Ergebnisse

Ein von Pain (o.J.) angegebener Wärmeentzug von etwa  $800 \text{ kWh/m}^3$  innerhalb von sechs Monaten konnte nicht erreicht werden. Das kann daran liegen, daß in der Gärtnerei Alteburg nicht über einen derart langen zusammenhängenden Zeitraum kontinuierlich Wärme entzogen wurde, da der Bedarf nicht vorlag. Wird eine mittlere Leistung von  $41 \text{ W/m}^3$ , wie sie in der Periode 1 während 73 Tagen vorlag, für einen Zeitraum von sechs Monaten angenommen, ergäbe das einen Wärmeentzug von nur  $177 \text{ kWh/m}^3$ . Selbst bei einer hohen Leistung von  $80 \text{ W/m}^3$ , die sich zum Beginn der Periode 4 bei einer mittleren Miettemperatur von  $62^\circ\text{C}$  für wenige Tage einstellte, läge der Wärmeentzug in sechs Monaten nur bei  $346 \text{ kWh/m}^3$ . Die entzogenen  $111 \text{ kWh/m}^3$ , das entspricht 12,7 % des Energiegehaltes vom Holz, stellen nicht das Maximum dar, da aus technischen Gründen nach 259 Tagen Rottezeit wegen defekter Wärmetauscherrohre kein weiterer Wärmeentzug möglich war. Es wurde danach noch etwa ein Jahr lang Wärme produziert, wobei die Substrattemperaturen zeitweilig über  $60^\circ\text{C}$  lagen.

Ein Wärmeentzug aus der Miete vor Erreichen von Temperaturen im Bereich thermophiler Mikroorganismen ( $>45^\circ\text{C}$ ) ist für die Gewächshausbeheizung ungünstig, da die Vorlauftemperaturen zu niedrig sind. Beim Absinken der Vorlauf-

temperatur bis auf  $15^\circ\text{C}$ , wie zum Beginn der Entzugsperiode 1, besteht Frostgefahr im Gewächshaus. Es ist sinnvoller, erst eine ausreichend hohe Temperaturentwicklung in der Miete abzuwarten, bevor mit dem Wärmeentzug begonnen wird. Beim Aufbau einer zweiten Miete im Januar 1984 stiegen die Temperaturen innerhalb einer Woche auf  $65^\circ\text{C}$ . Der Wärmeentzug sollte dann nur so hoch sein, daß die Mietemperaturen nicht unter  $45^\circ\text{C}$  absinken. Um bei Außentemperaturen unter  $0^\circ\text{C}$  genügend Wärmekapazität aus der Miete zur Verfügung zu haben, sollte bei Außentemperaturen über  $0^\circ\text{C}$  der Wärmeentzug so weit wie möglich gedrosselt werden, um einen Anstieg der Mietemperaturen auf 60 bis  $70^\circ\text{C}$  zu erreichen.

Ein Wärmeentzug aus der Miete von 21 871 kWh entspricht einem Öläquivalent von etwa 2200 l. Wird für die veraltete Heizungsanlage in dem Betrieb, 30 m vom Gewächshaus entfernt, ein Wirkungsgrad von 0,7 unterstellt, ergibt sich eine Einsparung an Heizöl von etwa 3140 l (31 306 kWh). Demgegenüber steht der energetische Aufwand für die Zerkleinerung des Schnittholzes mit 459 l Diesel (4576 kWh) für den Traktor und der Stromverbrauch der Umwälzpumpe mit 336 kWh. Der Netto-Energiegewinn beträgt danach 26 394 kWh.

Im Rahmen einer ökonomischen Bewertung dürften für die Arbeit keine Kosten angesetzt werden, da während des Aufbaus der Miete in den Monaten November bis Januar in dem Gartenbaubetrieb keine anderen Arbeiten möglich sind und Alternativen außerhalb des Betriebes nicht vorhanden sind. Eine monetäre Bewertung des Kompostes bzw. Mulches ist außerordentlich schwierig, da die Auswirkungen bei dessen Anwendung vielfältig und kaum bewertbar sind. So ist mit besserem Pflanzenaufwuchs durch verbesserte Bodenstruktur zu rechnen, mit geringerer Wasserverdunstung, mit weniger Verunkrautung, mit geringerem Krankheitsbefall und mit einer Zufuhr von Pflanzennährstoffen. Dies führt zu höheren Erträgen bei geringerem Aufwand an mechanischer (Hand-)Bodenbearbeitung, Wasser, Spritz- und Düngemitteln. Wird für  $1 \text{ m}^3$  Kompost ein Preis von DM 60,- angenommen, wie er im Handel für vergleichbaren losen Rindenhumus zu zahlen ist, kann der Gesamtwert des Kompostes mit DM 8400,- angesetzt werden.

Besondere Aufmerksamkeit ist der ausreichenden Befeuchtung des Häckselgutes zu widmen, um einen optimalen Rotteprozeß zu ermöglichen. Einzelne trockene Nester in der Miete waren noch nach 20 Monaten Rottezeit zu finden. Dort war das Holz verpilzt, hydrophob und kaum zersetzt. Daher sollte beim Aufsetzen der Miete ständig eine künstliche, feintropfige Beregnung vorgenommen werden, was während der Wintermonate wegen der Frostgefahr aber nicht immer möglich ist. Ein Feuchtegehalt um 50 % wird als optimal angesehen.

Eine Zugabe von Stickstoff zur Verengung des weiten C/N-Verhältnisses, damit zur Beschleunigung der Rotte, ist unter dem Gesichtspunkt der Wärmegewinnung nicht unbedingt sinnvoll. Wird eine kurze, intensive Rotte mit entsprechend großer Wärmeentwicklung benötigt, sollte Stickstoff zugesetzt werden, wobei nach den Versuchen von Fischer und Rannertshäuser (1982) 2 kg Harnstoff je  $\text{m}^3$  Häckselgut ausreichen. Die exotherme Phase der Rotte war nach diesen Versuchen nach etwa vier Monaten abgeschlossen. Wird eine lang anhaltende Wärmequelle benötigt, ist ein Stickstoffzusatz nicht notwendig. Wie hoch die Gesamtwärmeentwicklung bei unterschiedlichen C/N-Verhältnissen ist, ist nicht bekannt.

Unbefriedigend ist die Technik des Wärmeentzuges aus der Miete gelöst. Die Handhabung der PE-Wärmetauscher-

rohre ist sowohl beim Auf- als auch Abbau der Miete schwierig. Bei kühler Witterung sind die Rohre relativ steif und schwer zu biegen. Ein Abbau der Miete mit eingelegten Rohren ist nur von Hand möglich und sehr arbeitsintensiv. Es sollten daher andere Wege des Wärmeentzuges untersucht werden. Das könnte ein Wärmeentzug mit einem Gebläse sein, das über gelochte Rohre die erwärmte Luft aus der Miete absaugt. Für eine Gewächshausbeheizung ist auch eine Rotte direkt im Gewächshaus denkbar, wenn auch die sich entwickelnde hohe Luftfeuchtigkeit für die Jungpflanzen die Gefahr von Pilzbefall mit sich bringt. Vorteilhaft für die Pflanzenentwicklung wäre eine Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes in der Luft. Weitere denkbare Lösungen wären teilweise mit wärmeisolierender Folie abgedeckte Mieten in paralleler Anordnung zur Längsachse der Gewächshäuser, wobei die aufsteigende Rottwärme durch die seitlichen Lüftungsclappen in die Gewächshäuser gelangt. Auch der Aufbau von Foliengewächshäusern bzw. Folientunneln über die Schnittholzieten sollte geprüft werden. In allen Fällen wäre das einfache, mechanisierbare Auf- und Abbauen der Mieten möglich.

#### Zusammenfassung

Aus einer 197 m<sup>3</sup> großen Miete aus gehäckseltem Schnittholz wurde die bei der Kompostierung entstehende Wärme entzogen und zur Heizung eines 110 m<sup>2</sup> großen Gewächshauses verwendet. In der Miete lagen als Wärmetauscher 2550 m Polyäthylenrohr (3/4"), die, angetrieben durch eine 50 W-Umwälzpumpe, mit Wasser durchströmt wurden. In der Zeit von Februar bis Oktober 1983 konnten etwa 22 000 kWh (111 kWh/m<sup>3</sup>; 0,635 kWh/kg TS; 0,657 kWh/kg OTS) entzogen werden, wobei die Vorlauftemperaturen 30 bis 40 °C betragen. Während der ersten Monate des Wärmeentzuges lag die mittlere Leistung der Miete bei etwa 8 kW (40 W/m<sup>3</sup>; 0,234 W/kg TS; 0,243 W/kg OTS). Nach neun Monaten konnte keine Wärme mehr entzogen werden, da die Rohre durch Setzbewegungen innerhalb der Miete zerstört worden waren. Die Temperaturen in dem Zentrum der Miete lagen nach 20 Monaten noch bei 60 °C. In der Gärtnerei konnten etwa 3140 l Heizöl (31 306 kWh) eingespart werden; für das Zerkleinern des Schnittholzes wurden 459 l Diesel (4 576 kWh) und für die Umwälzpumpe 336 kWh verbraucht. Etwa 140 m<sup>3</sup> blieben als Mulch bzw. Kompost zurück.

#### Heat recovery during composting of brushwood

From a 197 m<sup>3</sup> heap of chopped brushwood the heat generated by the composting process was recovered and used for heating a greenhouse (110 m<sup>2</sup>). The heat exchangers in the heap were 2550 m Polyethylentubes (3/4") flowed through with water by a 50 W pump. From February to October 1983 nearly 22 000 kWh (111 kWh/m<sup>3</sup>; 0.635 kWh/kg d.m.; 0.657 kWh/kg organ.d.m.) were recovered with a temperature between 30 and 40 °C. In the first months of heat recovery the power of the heap was nearly 8 kW (40 W/m<sup>3</sup>; 0.234 W/kg d.m.; 0.234 W/kg d.m.; 0.243 W/kg organ.d.m.). After 9 months it was not possible to recover any more heat, because the tubes were destroyed by setting-movements in the heap. The temperatures in the centre of the heap were 60 °C after 20 months. The gardening saved up nearly 3140 l oil (31 306 kWh); for chopping the brushwood 459 l oil (4576 kWh) were used and for the pump 336 kWh. Nearly 140 m<sup>3</sup> remained as mulch resp. compost.

Bei Frau Anette und Herrn Alfred Schult von der Gärtnerei Alteburg möchte ich mich für die gewissenhafte Überwachung der Meßeinrichtungen, der Datenerfassung und die herzliche Aufnahme besonders bedanken, ebenso wie bei Herrn Jürgen Bredford (Institut für Technologie) für seine Mitarbeit.

#### Literatur

Bosma, A. H. und Dervedde, W.: Measuring the particle length of chopped forage. Proceedings of the Conference on Forage Conservation in the 80's, British Grassland Society, Brighton 1979, S. 331-334.

Bramigk, D.: Wärmegewinnung aus größeren Kompostmieten - Biomeiler. Information des „Aktionszentrum Umweltschutz Berlin“, Februar 1983.

Eggersglüss, W.: Persönliche Mitteilung vom 21.9.1984.

Fischer, P. und Rannertshäuser, J.: Aufbereitung und Verwendung von Schnittholz. Teil II: Kompostierung von Schnittholz. - Das Gartenamt 31 (1982), H. 5, S. 309-315.

Graefe, G.: Dünger und Energie aus Traubentrestern. - Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung, Wien, 1983.

Kessel, H. W.: Wärmegewinnung aus Fest- und Flüssigmist. - Landtechnik (1978), H. 2, S. 76-78.

Kramer, K.-H.; Moser, E.; Rannertshäuser, J.; Schulze-Lammers, P. und Sinn, H.: Verwertung von Obstbaum-Schnittholz. - KTBL-Schrift 275, Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup 1982.

Lohfeld, K. H.: Beispiele rationeller Abfallentsorgung und Verwertung auf Friedhöfen. - Deutsche Friedhofskultur 70 (1980), H. 7, S. 181-187.

Pain, J.: Die Methoden Jean Pain. - 8. Auflage (o.J.), Eigenverlag Ida Pain, 83930 Villecroze, Frankreich.

Schuchardt, F.: Recovery of heat from the composting of horse manure. - Seminar „Composting of Organic Wastes“ des Jutland Technological Institute, Aarhus, Dänemark; 8.-9. November 1982, S. 91-101.

Schuchardt, F.: Versuche zum Wärmeentzug aus Festmist. - Landbauforschung Völknerode 33 (1983), H. 3, S. 169-178.

Schulz, H.; Perwanger, A. und Mitterleitner, H.: Einsatzmöglichkeiten verschiedener Energieträger in der Landwirtschaft. - Endbericht des Landtechnischen Vereins in Bayern e.V. und der Landtechnik Weihenstephan über den Forschungsauftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (1982), 327 S.

Theuner, H.: Abfallverwertung am Beispiel Friedhöfe und städtische Grünanlagen. - Studienreihe Abfall-now Band 1 (1983), Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Stuttgart.

Thostrup, P. und Berthelsen, L.: Kompostierungsvarme fra fast staldgødning. - Meddelelse Nr. 43 (1983), Jordbrugsteknisk Institut Tastrup, Dänemark.

Verfasser: Schuchardt, Frank, Wiss. Oberrat, Dr. agr. Institut für Technologie der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völknerode (FAL), Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Baader.