

Klaus Gottschalk und Volkhard Scholz

Thermodynamische Modellierung für die Hackschnitzzellagerung

Der Feuchtegehalt von Holzhackschnitzeln beeinflusst ihre Lagerfähigkeit in starkem Maße. Der Trocknungsverlauf der Holzhackschnitzel im Haufen ist stark von der Korngröße und von der Korngrößenverteilung abhängig. Weiterer Einflussfaktor ist der Masseverlust durch mikrobielle Umsetzungsvorgänge. Feldholz (Pappel und Weide) aus Kurzumtriebs-Plantagen wurde zu Hackschnitzeln aufbereitet und anschließend in Versuchen durch Zwangsbelüftung mit erwärmter Luft getrocknet. Auf Grundlage der Temperaturverläufe in den Schüttungen für die verschiedenen Varianten wurde ein thermodynamisches Modell angepasst, um die Temperaturverläufe in der Simulation berechnen zu können.

Schlüsselwörter

Modellierung Holzhackschnitzeltrocknung,
Holzhackschnitzzellagerung

Keywords

Model wood chip drying, wood chip storage

Abstract

Gottschalk, Klaus and Scholz, Volkhard

Thermodynamic model for wood chip storage

Landtechnik 64 (2009), no. 5, pp. 322 - 325, 5 figures,
1 table, 3 references

Moisture content significantly influences the storability of wood chips. Other factors are mass loss due to microbial metabolic processes and the development of pathogenic moulds causing hygienic problems if the contamination of the pile exceeds critical quantities. The drying process of the wood chips in the pile largely depends on particle size and particle size distribution. A thermodynamic model of the drying processes shows the development of temperature and moisture content in piles of different heights.

Die Gewinnung von Biofestbrennstoffen erlangt zunehmende Bedeutung, um alternative Energiegewinnungsverfahren und Anbaumöglichkeiten für Landwirte zu schaffen. Eine vorhergehende Trocknung erhöht den Heizwert des Biofestbrennstoffes und verbessert dessen Lagerfähigkeit. Da Holz

als Brennstoff in Konkurrenz zu fossilen Energieträgern steht, sind die Verfahren zur Gewinnung von brennfähigen Holzhackschnitzeln insgesamt derart zu rationalisieren, dass gute Absatzerlöse erlangt werden [3].

Feldholz (Pappel und Weide) aus Kurzumtriebs-Plantagen wurde zu Hackschnitzeln (**Abbildung 1**) aufbereitet und anschließend in Versuchen durch Zwangsbelüftung mit erwärmter Luft getrocknet. Auf Grundlage der Temperaturverläufe in den Schüttungen für verschiedene Varianten können mittels eines thermodynamischen Modells die Trocknungsvorgänge, d.h. die Temperatur- und Feuchteverläufe, für Holzhackschnitzel aus Pappel unterschiedlicher Korngrößen im Haufen, grob (24 mm), mittel (14 mm) und fein (8,5 mm) berechnet werden.

Abb. 1



Pappel – fraktioniert, mittel / Poplar – medium size, separated

Holzhackschnitzel; Größe: mittel, fraktioniert. Foto: ATB
Fig. 1: Wood chips; size: medium, separated

Modell der Wärme- und Stoffübergänge

Bei gleichmäßiger Durchströmung der Holzhackschnitzelschüttung findet ein Wärme- und Stoffaustausch zwischen den einzelnen Partikeln der Schüttung und der an den Partikeln vorbeiströmenden Luft statt. Dabei kann ein Wärme- und Stofffluss (Wasserdampf) zwischen Partikeln und (feuchter) Luft in beiden Richtungen stattfinden.

Die Flussrichtung ergibt sich aus Potenzialgefällen, die gewissermaßen als „treibende Kraft“ wirken; das sind hier Temperaturdifferenz bzw. Feuchtegraddifferenz. Bei Trockengut wird eine feuchtegesättigte Oberfläche (= Grenzfläche zwischen Partikeln und Luft) angenommen.

In der Wechselwirkung zwischen den Holzhackschnitzeln und der durchströmenden Luft werden die Gesetzmäßigkeiten des Wärme- und Stoffaustausches wirksam:

- Besteht zwischen Luft und Partikeln eine Temperaturdifferenz, so wird von der Luft an die Partikel Wärme übertragen. Die Gesetzmäßigkeiten der Wärmeübertragung in durchströmten Schüttungen können angewandt werden.
- Besteht zwischen dem in den Partikeln enthaltenen Wasser und dem in der Luft enthaltenen Wasserdampf eine Dampfdruckdifferenz, so verdunstet Wasser von der Partikeloberfläche in die Luft. Die Gesetzmäßigkeiten des Stofftransports lassen sich anwenden.
- Der für der einzelnen Partikel geltende Wärme- und Stofftransport lässt sich längs eines Strömungspfades der Luft über die gesamte Höhe der Schüttung integrieren.

Hierzu ist das Problem in dem mathematischen Modell zu einer eindimensionalen Strömung durch die Schüttung vereinfacht. Die Schüttung ist in einzelne Schichten unterteilt mit jeweils einer dem Durchmesser der Partikel entsprechenden Schichtdicke. Im mathematischen Modell sind die Bilanzgleichungen zum Masse- (Wasser) und Wärmetransport aufgestellt.

Hinzu kommen die gängigen Gleichungen zum Stoff- und Wärmeübergang sowie die Zustandsgleichungen für die Luftfeuchte. Das System der Gleichungen ist mittels der Finite-Differenzen-Methode (FDM) diskretisiert und wird für jeden Zeitschritt und jede Schichtdicke entlang paralleler Stromlinien durch die Schüttung berechnet.

Bei der Aufstellung der Bilanzgleichungen wurden folgende physikalische Gegebenheiten berücksichtigt:

- Wärmebilanz (Gl. (1))
- Wärmeübergang (Gl. (2))
- Stoffbilanz Gl. (4))
- Stoffübergang (Gl. (5))
- Verdampfungsenthalpie (Gl. (1), rechter Term)
- Druckverlust in der Schüttung (Gl. (7))
- Luftgeschwindigkeit

Aus diesen physikalischen Gegebenheiten wird die Temperatur der Luft, die Feuchtebelastung der Luft, die Temperatur der Hackschnitzel und der Feuchtegehalt der Hackschnitzel

entlang der Schütthöhe instationär berechnet. Es wurden folgende vereinfachende Modellannahmen getroffen: Die Schüttung ist homogen verteilt, Stoff- und Wärmeübergänge finden an diskreten Schichten der porös angenommenen Schüttung statt, die Zuluftbedingungen (Randbedingungen) sind konstant, die physikalischen Parameter sind konstant, die Schütthöhe ist konstant (d.h. Schwund ist noch nicht berücksichtigt).

Das Gleichungssystem ist:

$$\frac{dj_Q}{dz} = -c_K \rho_K \frac{dT_K}{dt} + \eta \frac{dj_m}{dz} \cdot (r_0 + c_{pD} \cdot T_K) \quad (\text{Kontinuitätsgleichung Wärme}) \quad (1)$$

$$[j_Q]_{\text{Oberfl}} = \alpha (T_K - T_L) \quad (\text{Wärmeübergang Oberfläche - Luft}) \quad (2)$$

$$\frac{dj_Q}{dz} = \frac{\dot{m}_L}{A} \left[c_L \frac{dT_L}{dz} - r_0 \frac{dx}{dz} \right] \quad (\text{Wärmetransport Schicht - Schicht}) \quad (3)$$

$$\frac{dj_m}{dz} = -\rho_K \frac{du}{dt} \quad (\text{Kontinuitätsgleichung Stoff}) \quad (4)$$

$$[j_m]_{\text{Oberfl}} = k(x_K - x) \quad (\text{Stoffübergang Oberfläche - Luft}) \quad (5)$$

$$\frac{dj_m}{dz} = \frac{\dot{m}_L}{A} \frac{dx}{dz} \quad (\text{Stofftransport Schicht - Schicht}) \quad (6)$$

mit

T_K	K	absolute Temperatur des Partikels
T_L	K	absolute Temperatur der Luft
j_Q	$J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$	Wärmeflussdichte
j_m	$kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$	Massenflussdichte
α	$J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Wärmeübergangskoeffizient
c_K	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	spez. Wärmekapazität des Partikels
c_L	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	spez. Wärmekapazität der Luft
u	$kg \cdot kg^{-1}$	Wassergehalt des Partikels
x	$kg \cdot kg^{-1}$	Feuchtegrad (der Luft; absolut)
x_K	$kg \cdot kg^{-1}$	Feuchtegrad (der Luft; absolut) bei Oberflächentemperatur
η	$J \cdot s^{-1} \cdot m^{-3}$	Wärmeflussdichte durch biol. Prozess induziert
z	m	Höhe innerhalb Schüttung
A	m^2	Oberfläche des Partikels
\dot{m}	$kg \cdot s^{-1}$	Massenstrom
t	s	Zeit

Tab. 1

Physikalische Eigenschaften der Holzhackschnitzel

Table 1: Physical properties of wood chips

	Pappel unfraktioniert		Pappel fraktioniert		
	grob g	fein f	grob fg	mittel fm	fein ff
Mittlere Korngröße [mm]	19,50	9,30	23,70	13,60	8,5
Schütthöhe [m]	1,10	1,25	1,05	1,18	1,25
Frischmasse FM [kg]	58,05	68,40	56,09	58,37	55,31
Schüttdichte tr. ¹⁾ [kg · m ⁻³]	89,04	116,31	89,38	81,16	84,77
Trockensubstanz ²⁾ TS [%]	48,50	46,70	50,90	51,00	47,8
Porosität [-]	0,74	0,66	0,74	0,76	0,75
Schwund [%]	47,40	33,70	47,80	48,80	40,2
Luftrate [x10 ⁻⁶ m ³ · s ⁻¹ · kg ⁻¹]	115,00	51,50	650,00	700,00	210
Luftgeschwindigkeit durch Schüttung [m · s ⁻¹]	0,01-0,02	0,005-0,010	0,07-0,10	0,09-0,10	0,02...0,03
α^3	900,00	1000,00	300,00	550,00	1500
β^3	1,43	0,87	1,74	1,43	0,75

¹⁾Nach Trocknungsversuch; ²⁾Vor Trocknungsversuch; ³⁾Gemäß Gl. (7)

Der Verdampfungsvorgang ist durch den letzten Term in Gl. (1) ausgedrückt. Der Stoff- und Wärmeübergang findet in der Grenzschicht zwischen der Körperoberfläche und der umgebenen (strömenden) Luft statt (mit den Übergangskoeffizienten α und k). Bei freier konvektiver Belüftung stellt sich durch Temperaturdifferenzen innerhalb der Schüttung und Temperaturdifferenzen der Schüttung gegen die Umgebungsluft eine Strömung ein, die durch den Strömungswiderstand (Gl. (7)) begrenzt wird.

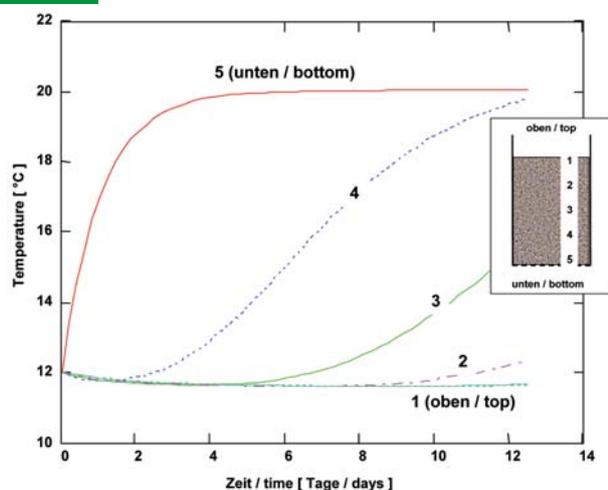
Experimentelle Untersuchungen

Die Feldgehölze Pappel (Sorte: Japan 105) und Weide (*Salix viminalis*) stammen von Versuchsfeldern (Energieplantage)

des ATB. Die Pappel wurde als Grobhackschnitzel (mittlere Korngröße ca. 20 mm) und als Feinhackschnitzel (mittlere Korngröße ca. 10 mm) mit einem Anbauhacker mit jeweils verschiedenen Maschineneinstellungen gehackt. Drei weitere Proben an Pappel-Hackschnitzeln wurden aus dem Grobhackgut mit einem Siebfractionierer (Siebgrößen 12 mm und 20 mm) in drei Größenklassen (grob, mittel, fein; **Tabelle 1**) fraktioniert, um zusätzliche Varianten hinsichtlich der Korngrößen zu erhalten. An Pappel-Holzhackschnitzeln standen somit 5 Größenvarianten zur Verfügung.

Im Trocknungsversuch wurde Außenluft von einem Radiallüfter gefördert, nachfolgend durch eine Heizung mit stufenlos

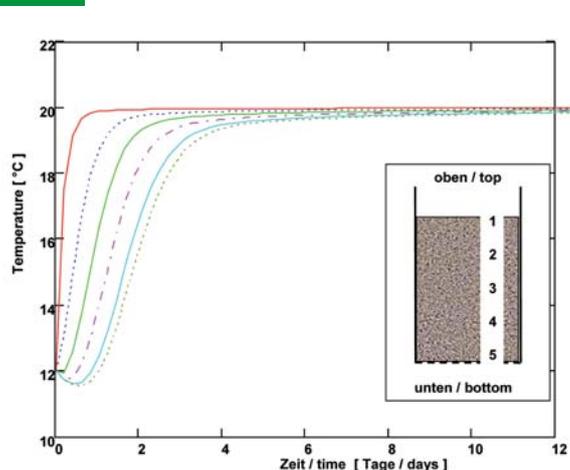
Abb. 2



Temperaturverlauf in Holzhackschnitzelhaufen, Modell; Korngröße: grob, unfraktioniert

Fig. 2: Temperature in wood chips bulk, model; chip size: coarse, non separated

Abb. 3



Temperaturverlauf in Holzhackschnitzelhaufen, Modell; Korngröße: grob, fraktioniert

Fig. 3: Temperature in wood chips bulk, model; chip size: coarse, separated

regelbarer Heizleistung erwärmt und dem Trockenraum zugeführt. Die Lüfterdrehzahl ist stufenlos einstellbar. Der Trockenraum wurde in 6 gleich große Kisten mit den Abmaßen ($B \times T \times H$) = (0,42 m × 0,52 m × 1,4 m) = 0,305 m³ und je einer Grundfläche von 0,22 m² aufgeteilt, die alle gleichzeitig mit der aufbereiteten Zuluft belüftet wurden. Die Luftstraten stellten sich für jede der befüllten Kisten aufgrund der unterschiedlichen Strömungswiderstände jeder Schüttung unterschiedlich ein.

Die Strömungswiderstände der Schüttungen mit den Parametern α , β in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit w durch die Schüttungen wurden gemäß

$$\frac{\Delta p}{h} = \alpha \cdot w^\beta \quad (\text{Druckverlust } \Delta p \text{ in der Schüttung durch Schütthöhe } h) \quad (7)$$

ermittelt (**Tabelle 1**).

Ergebnisse

Die Trocknungszeit betrug bei groben Holzhackschnitzeln ca. 7 Tage bei einer Endfeuchte von 10 %. Bei den mittleren Korngrößen betrug die Trocknungszeit 15 Tage, wobei die Oberfläche des Haufens feucht blieb. Die Trocknung bei den feinen Korngrößen führte nicht zu der angestrebten Endfeuchte innerhalb sinnvoller Zeit. Das beste Ergebnis konnte bei groben Holzhackschnitzeln mit homogener Korngrößenverteilung erreicht werden.

Die Ergebnisse der Messungen dienten zur Parameteranpassung des Modells. Für die verschiedenen Varianten an Korngrößen konnten qualitativ brauchbare Übereinstimmungen gefunden werden (**Abbildung 2** bis **Abbildung 4**); die Ergebnisse des Experiments sind in **Abbildung 5** dargestellt. Für Holzhackschnitzel „fraktioniert fein“ konnte keine zufriedenstellende Übereinstimmung gefunden werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in dem Modell derzeit nur konstante Anfangs- und Randbedingungen vorgegeben werden können. Eine

Erweiterung der Numerik um transiente Vorgaben, d.h. zeitlich variable Temperaturen für die Randbedingungen, könnte bessere Übereinstimmungen ermöglichen. Die oben erwähnte Temperaturinversion konnte jedoch modelliert werden. Das Modell kann dennoch für Vorhersagen der Trocknungsverläufe für verschiedene Varianten an Holzhackschnitzel-Korngrößen und verschiedene Lüftungsbedingungen herangezogen werden.

Schlussfolgerungen

Als „optimal“ wird ein Endfeuchtegehalt für lagerfähige getrocknete Hackschnitzel von 20 % betrachtet [1; 2], der in den Versuchen für grobes Pappel-Hackgut im gegebenen Trocknungszeitraum unterschritten wurde. Grobe Hackschnitzel mit möglichst homogener Größenverteilung (hier: fraktionierte Proben, **Abbildung 2**), d.h. mit geringen Beimengungen feiner Anteile erzielten die beste Durchströmung der Schüttung und die höchste Trocknungsgeschwindigkeit. Modellrechnungen erlauben es, den Trocknungsverlauf zu simulieren; der Abgleich mit experimentellen Werten zeigt annehmbar gute Übereinstimmungen mit den berechneten Verläufen.

Literatur

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] Gürtner, M.: Energie aus dem Wald. Fachtagung „Energetische Nutzung von Biomasse“, Forum für Zukunftsenergien e. V., Landtechnik Weihenstephan, TU München, Band 12 Freising, 27.-28.4.1992, 1992, S. 190–192
- [2] ● Ebert, H.-P.: Heizen mit Holz in allen Ofenarten. Ökobuch Verlag, Staufen i.Br., 1989
- [3] Scholz, V., C. Idler und W. Daries: Energieverlust und Schimmelpilzentwicklung bei der Lagerung von Feldholz-Hackgut. Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 39, 2005

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Klaus Gottschalk und **Dr.-Ing. Volkhard Scholz**

sind wissenschaftliche Mitarbeiter im Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB), Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam, E-Mail: kgottschalk@atb-potsdam.de

