

- [28] • *Nastenko, N.N.*, u. *L.A. Borosok*: Automatisierung von Produktionsprozessen in der Landwirtschaft. Moskau: Masgiz 1963.
- [29] *Zimmermann, M.*: Automatic tractors . . . (Mechanisierung einer 1600 ha großen Zukunftsfarm). *Implement & Tractor* Bd. 84 (1969) Nr. 2, S.30/31.
- [30] Driverless farm tractors. *J. IEE* Bd. 5 (1959) Nr.58, S. 584/85.
- [31] Driverless tractor used by Ford in testing and development work. *Implement & Tractor* Bd.73 (1958) Nr.11, S.38/39.
- [32] *De Liban, R.*: Automatic driverless warehouse trains. *SAE Paper* Nr.556 B 1962.
- [33] *Meyercordt, W.*: Automatisierung durch selbstgesteuerte Flurförderzeuge – Elektro-Gehgabelhubwagen und Elektro-Gehschlepper. *Klepzig Fachberichte* (1967) Sept., S.542/44.
- [34] *Zworykin, V.K.*: Possibilities of electronic control of automobiles. *Electric. Engng.* (1953) Sept., S.849/50.
- [35] *Bidwell, J.B.*, *A.F. Welch* u. *E.A. Hanysz*: Electronic highways. *General Motors Research Labor* 1960, GMR-245.
- [36] *Hoops, A.*: Modell eines auf festgelegter Fahrbahn elektronisch gelenkten Fahrzeugs. *Elektron. Rdsch.* Bd. 11 (1957) Nr.9, S.277/78.
- [37] *Morrison, H.M.*, *A.F. Welch* u. *E.A. Hanysz*: Automatic highway and driver aid developments. *SAE-Trans.* Bd.69 (1961) S.31/53.
- [38] *Müller, R.H.*: Das elektronische Versuchswagen-System (contidrom). *Kautschuk u. Gummi, Kunststoffe* Bd. 21 (1968) Nr. 11, S.637/38.
- [39] Ideas pile up for driverless cars, automated roadways. *Machine Design* (1968) April, S.20/29.
- [40] *Pichon, J.D.*, u. *G.W. Steinbruegge*: Propagating audio-frequency magnetic fields through soil. *Trans. ASAE* Bd. 8 (1965) Nr.2, S.264/66.
- [41] *Finn-Kelcey, P.*: Automation in agriculture. *Farm Mechanization* Bd.18 (1966) Nr.201, S.41/42.
- [42] *Finn-Kelcey, P.*: Automatic tractor will do the work in five years' time. *Agric. Machinery J.* (1966) Mai, S. 23.
- [43] Cable-guided tractors for field operations. *Agric. Machinery J.* (1967) Sept., S.29/30.
- [44] *Mac Hardy, F.V.*: An automatic guidance system for farm tractors. *Can. Agric. Engng.* Bd.9 (1967) Nr.1, S.17/19.
- [45] *Batel, W.*: Grundsätzliche Überlegungen zur Automatisierung der landwirtschaftlichen Produktion. *Grundl. Landtechnik* Bd.18 (1968) Nr. 1, S.14/20.

DK 631.879.4:66.047  
518.61:66.015.23/24

## Ein Beitrag zur numerischen Behandlung des gekoppelten Stoff- und Wärmeaustauschs bei der Trocknung von Frischkompost

Von Anton G. Meiering, Morgantown/USA, Oskar B. Hoffmann, Gießen, und Frederick W. Bakker-Arkema, East Lansing/USA

Die Trocknung von Frischkompost wurde experimentell und in einem Simulationsverfahren untersucht. Da die Biotzahlen für das Trocknungsgut kleiner als 0,1 angenommen werden konnten, blieben bei der Trocknung die Gradienten der Guttemperatur und der Gutsfeuchte innerhalb der Teilchen unberücksichtigt. Unter diesen Bedingungen sind zum Beschreiben des Stoff- und Wärmeübergangs von der Teilchenoberfläche zur Trocknungsluft die von *E. Klapp* aufgestellten Rechenansätze zulässig. Wegen des kleinen Einflusses der Guttemperatur auf das hygroskopische Gleichgewicht in der Grenzschicht wurde dieses lediglich als eine Funktion der Gutsfeuchte beschrieben. Die Wärmeübergangszahl und die Verdunstungszahl hängen vom Dampfdruck ab. Die theoretischen Ergebnisse stimmen sehr gut mit den Versuchsergebnissen überein. Es gelang, außer dem zeitlichen Verlauf der Temperatur der Trocknungsluft und anderen Abhängigkeiten insbesondere den Stand und die Ausdehnung der Trocknungszone im Simulationsmodell zu reproduzieren. Weiterhin wurde sowohl theoretisch als auch experimentell eine sehr große Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Trocknungsvorgangs von der Eingangstemperatur der Trocknungsluft festgestellt.

Die theoretische Behandlung des gekoppelten Stoff- und Wärmeaustauschs hat in letzter Zeit neuen Auftrieb erhalten, da es mit Hilfe der elektronischen Rechenanlagen möglich wurde, die oft recht verwickelten Rechenansätze numerisch zu lösen. Eine einwandfreie, allgemeingültige mathematische Beschreibung der Übertragungsvorgänge von der Teilchenoberfläche innerhalb einer Teilchenschüttung zum Trocknungsmedium gelang zunächst *E. Klapp* [1;2]. Obwohl er das aufgestellte System von partiellen Differentialgleichungen auf Grund einiger sehr vereinfachender Annahmen analytisch einer nur begrenzt gültigen Lösung zuführte, bleiben doch seine Rechenansätze im Hinblick auf das Anwenden von elektronischen Rechenanlagen von weit größerer Bedeutung.

---

*Die hier beschriebenen Untersuchungen wurden im Auftrage der Stadtverwaltung der Stadt Heidelberg im Institut für Landtechnik in Zusammenarbeit mit dem Institut für Mikrobiologie in Gießen begonnen. Der Trocknerbau, die Instrumentierung und die Versuchsausführung lagen in Händen von Herrn Ing. grad. W. G. Schröder. Die theoretische Auswertung wurde von Herrn Prof. A. G. Meiering nach seinem Institutswechsel im Rahmen eines Forschungsauftrages der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Agricultural Engineering Department der Michigan State University in Zusammenarbeit mit Herrn Prof. F. W. Bakker-Arkema abgeschlossen.*

Bei seinem Modell vernachlässigte *F. Klapp* allerdings den Stoff- und den Wärmetransport innerhalb der Teilchen einer Schüttung. Wie *E. W. Bakker-Arkema* [3;4] nachweisen konnte, gewinnt die Diffusion zur Teilchenoberfläche mit zunehmender Teilchengröße erheblich an Bedeutung und übt daher einen bestimmenden Einfluß auf den Trocknungsverlauf einer Schüttung aus. In der folgenden Betrachtung wird der Trocknungsvorgang in einer sehr dispersen Schüttung unter Anwendung numerischer Verfahren simuliert; Diffusionsvorgänge innerhalb der Teilchen bleiben dafür wegen der kleinen Teilchengrößen und der lockeren Teilchenstruktur unberücksichtigt. Trotz einiger Vereinfachungen gelang es, den durch Messungen ermittelten Trocknungsverlauf in allen Fällen mit Hilfe einer elektronischen Rechenanlage zu rekonstruieren.

### Versuchsbeschreibung

Das Versuchsgut bestand aus dunkel gefärbtem Frischkompost, wie er in der Müllaufbereitungsanlage der Stadt Heidelberg anfällt. Seine Gesamttrockenmasse besteht zu etwa 40 % aus organischer Substanz. Das Gut ist hygroskopisch und hat im ungetrockneten Zustand einen Wassergehalt von rd. 40 %. Die Raumdichte im Trockner wurde nach gleichmäßigem Einfüllen und mehrstündigem Absetzen mit durchschnittlich  $700 \text{ kg/m}^3$  festgestellt. Hierbei betrug das pyknometrisch ermittelte relative Gesamtporenvolumen rd. 80 %. Der Frischkompost besteht aus einem Gemisch grober und feiner Teilchen (1 bis 2 mm Dicke der Teilchen bis Staubfraktion) von unregelmäßiger, teils faserförmiger und sehr lockerer Struktur sowie von uneinheitlicher Zusammensetzung.

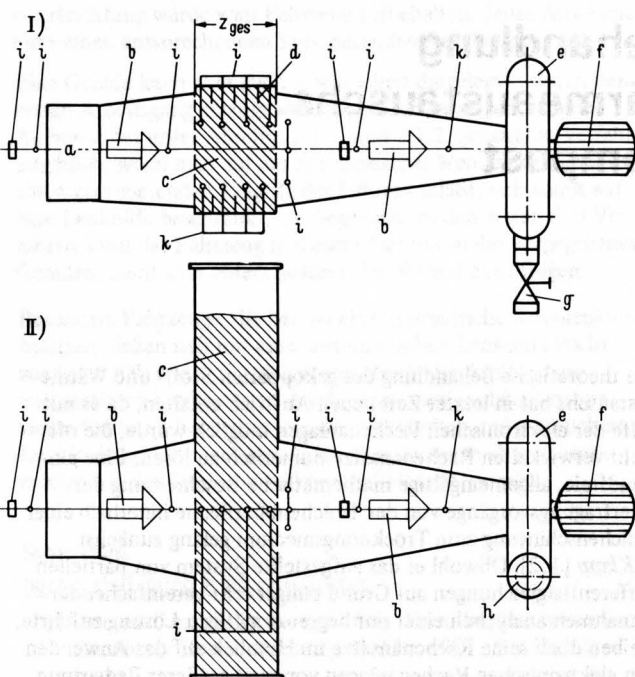


Bild 1. Schema des Versuchstrockners.

- a Heizung
- b Durchströmrichtung
- c mit Trocknungsgut gefüllte Säule
- d Blechprofile
- e Absauggebläse
- f Motor
- g Ventil
- h Ausblas
- i Temperatur- und Feuchtigkeitsmeßstellen
- k Druckmeßstellen
- I) Draufsicht
- II) Seitenansicht

Er verhält sich biologisch aktiv; seine Lagerfähigkeit ist daher begrenzt und soll durch Trocknen mittels der aus der Müllverbrennungsanlage anfallenden Abwärme verbessert werden. Vom biologischen Standpunkt aus wurde verlangt, daß die im Gut enthaltene Mikroflora nicht durch zu hohe Trocknungstemperaturen zerstört, sondern durch schonende Behandlung lediglich vorübergehend inaktiviert wird.

Bild 1 zeigt den für die Trocknungsversuche benutzten säulenförmigen Modelltrockner mit einer Grundfläche von  $0,125 \text{ m}^2$  ( $0,5 \text{ m} \times 0,25 \text{ m}$ ), den man bis zu rd. 2 m Höhe mit Frischkompost füllen konnte. Etwa in der Mitte der Gutsäule wurde die Trocknungsluft durch zwei gleichgroße Öffnungen in der Vorder- und der Rückseite des Trockners im Saugverfahren quer durch das Gut geleitet. Um den Einfluß der Trocknerwände auf den Luftstrom auszuschalten, hatte man jede Seitenwand in Höhe der Öffnungen mit drei rechtwinklig von der Wand abstehenden, lotrecht verlaufenden Blechprofilen *d* von 50 mm Breite und 700 mm Länge versehen. Die Profile griffen in das Gut ein und blockierten den Luftweg entlang der Wand. Die Regelung des Luftdurchsatzes geschah auf der Abluftseite mit Hilfe einer Drosselklappe. Vor dem Trockner befand sich ein elektrisches Heizgerät *a*, dessen Leistung sich durch Zu- und Abschalten von Heizstäben regeln ließ. Die Temperaturen bzw. die relativen Luftfeuchtigkeiten wurden mit Widerstandsthermometern bzw. mit LiCl-Hygrometern an den in Bild 1 angegebenen Meßstellen *i* fortlaufend registriert. Bei einigen Versuchen schirmte man die in das Gut eingebetteten Temperaturfühler mit feinmaschigem Drahtgewebe ab. Auf diese Weise konnte der Temperaturverlauf der Trocknungsluft mit guter Annäherung bestimmt werden. Die Feuchtigkeit der in der Trocknermitte entnommenen Gutproben ermittelte man nach dem Trockenschrankverfahren.

### Die Theorie des Trocknungsvorgangs

Die Stoff- und Wärmeübertragung beim Trocknen eines hygroskopischen Schüttguts läßt sich nach *E. Klapp* [1;2] für konstante Eingangsbedingungen und stationäre Veränderungen von Luftfeuchte und -temperatur durch die Beziehungen

$$\frac{\partial T_L}{\partial z} = - \frac{\alpha F}{v_L Q_L c_{pL}} (T_L - T_G) \quad (1a),$$

$$\frac{\partial T_G}{\partial t} = \frac{\alpha F}{c_G Q_G} (T_L - T_G) - \frac{r \sigma F}{c_G Q_G} (X_{G1} - X_L) \quad (1b),$$

$$\frac{\partial X_L}{\partial z} = \frac{\sigma F}{v_L Q_L} (X_{G1} - X_L) \quad (1c),$$

$$\frac{\partial X_G}{\partial t} = - \frac{\sigma F}{Q_G} (X_{G1} - X_L) \quad (1d)$$

beschreiben. Dabei bedeuten  $T_L$  und  $T_G$  die Temperatur der Trocknungsluft (mit der Dichte  $Q_L$  und der spezifischen Wärme  $c_{pL}$  bei konstantem Druck) bzw. des Trocknungsguts (mit der Raumdichte  $Q_G$  und der spezifischen Wärme  $c_G$ ),  $X_L$  den Feuchtegrad der Luft (auf trockene Luft bezogen),  $X_{G1}$  den Gleichgewichtsfeuchtegrad (auf trockene Luft bezogen),  $X_G$  die Gutsfeuchte (auf Trockenmasse des Guts bezogen),  $z$  die Tiefe der Schüttung,  $t$  die Trocknungszeit,  $\alpha$  die Wärmeübergangszahl,  $\sigma$  die Verdunstungszahl,  $F$  die spezifische (volumbezogene) austauschfähige Gutsoberfläche,  $v_L$  die Luftgeschwindigkeit und  $r$  die Verdunstungswärme. Unter der Gutstemperatur  $T_G$  und der Gutsfeuchte  $X_G$  sind Durchschnittswerte zu verstehen. Da der konvektive Stoff- und Wärmeaustausch vom Feuchtegrad und von der Temperatur in der Grenzschicht abhängen, ist das Verwenden von  $T_G$  und  $X_G$  nur dann erlaubt, wenn sich die Durchschnittswerte nicht wesentlich von den Werten in der Grenzschicht unterscheiden.

Der in den Versuchen verwendete Frischkompost besteht zum großen Teil aus kleinen Teilchen mit entsprechend kurzer Entfernung von der Teilchenmitte bis zur Teilchenoberfläche. Das Gefüge sowohl der kleinen als auch der lose zusammenhängenden größeren Bestandteile dürfte sich nach der Zerkleinerung des Mülls in der Reißanlage und der anschließenden Heißvergärung im Gärturm soweit gelockert haben, daß der Diffusion der Gutsfeuchtigkeit innerhalb der Teilchen ein nur kleiner Widerstand entgegengesetzt wird. Trotz fehlender Meßdaten über den mittleren Teilchendurchmesser  $d$ , den Diffusionskoeffizienten  $D$  und der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  sei daher angenommen, daß sich beide Biotzahlen

$$\text{Bi}^* = \sigma d/D \quad \text{für den Stoffübergang}$$

$$\text{und Bi} = \alpha d/\lambda \quad \text{für den Wärmeübergang}$$

größenordnungsmäßig in den Bereich  $< 0,1$  einordnen lassen. In diesem Falle kann man – ohne die Genauigkeit der Rechnung wesentlich zu beeinträchtigen – auf die Berücksichtigung der internen Feuchtigkeits- und Temperaturgradienten verzichten und mit Durchschnittswerten der Gutsfeuchte und der Gutstemperatur rechnen [5]. Weiterhin wurde unterstellt, daß der Wärmeübergang durch Leitung zwischen den Teilchen vernachlässigt bleiben kann und in dem betrachteten Gutsquerschnitt kein Temperatur- und Konzentrationsgefälle senkrecht zur Strömungsrichtung der Trocknungsluft entsteht. Unter diesen Bedingungen wird der Trocknungsvorgang durch das Modell von *E. Klapp* korrekt beschrieben.

Der Feuchtegrad der Luft in der Grenzschicht ergibt sich nach der Beziehung

$$X_{G1} = 0,622 \frac{p_s \varphi}{p - p_s \varphi} \quad (2)$$

mit  $\varphi = p_D/p_s$  als der relativen Luftfeuchtigkeit,  $p$  als dem gesamten statischen Druck,  $p_D$  als dem Dampfdruck des Wassers und  $p_s$  als dem Sättigungsdruck des Wasserdampfes bei der Gutstemperatur  $T_G$ . Die Stoffübergangszahl  $\beta$  und die Wärmeübergangszahl  $\alpha$  bilden im Fall des rein turbulenten Austauschs, der für den hier behandelten Fall angenommen wird, das Verhältnis [6]

$$\frac{\alpha}{\beta} = Q c_p \frac{p - p_D}{p} \quad (3)$$

mit  $Q$  als der Dichte und  $c_p$  als der spezifischen Wärme des Wasserdampf-Luft-Gemischs.

Setzt man  $\sigma = Q\beta$  sowie  $c_p = c_{pL}$  und substituiert  $p_D$  in Gl. (3) nach Gl. (2), so ergibt sich die Verdunstungszahl

$$\sigma = \frac{\alpha}{c_{pL}} \frac{X_{G1} + 0,622}{0,622} \quad (4)$$

Das System gemäß Gl. (1 a) bis (1 d) läßt sich jetzt durch Einsetzen von Gl. (4) und Zusammenfassen der Stoffgrößen und der Parameter zu den abgekürzt geschriebenen Größen  $a$  bis  $c$  auf die Form

$$\frac{\partial T_L}{\partial z} = -a (T_L - T_G) \quad (5 a),$$

$$\frac{\partial T_G}{\partial t} = b (T_L - T_G) - c d (X_{G1} + 0,622)(X_{G1} - X_L) \quad (5 b),$$

$$\frac{\partial X_L}{\partial z} = \frac{a}{0,622} (X_{G1} + 0,622)(X_{G1} - X_L) \quad (5 c),$$

$$\frac{\partial X_G}{\partial t} = -d (X_{G1} + 0,622)(X_{G1} - X_L) \quad (5 d)$$

bringen. Um die numerische Lösung dieses Systems mathematisch zu stabilisieren, kann man zunächst die Variablen  $T_L$  und  $X_L$  sowie

die Ableitungen  $\sigma X_G/\partial t$  und  $\sigma T_G/\partial t$  zur Zeit  $t = 0^+$  ( $z$ -Achse) berechnen. Unter Einbeziehung der Randbedingungen

$$T_L(0, t) = T_{L0} \quad (6 a),$$

$$X_L(0, t) = X_{L0} \quad (6 b),$$

$$T_G(z, 0) = T_{G0} \quad (6 c),$$

$$X_G(z, 0) = X_{G0} \quad (6 d)$$

ergeben sich dann die nur auf der  $z$ -Achse gültigen Lösungen

$$T_L(z, 0) = (T_{L0} - T_{G0}) e^{-az} + T_{G0} \quad (7 a),$$

$$X_L(z, 0) = (X_{L0} - X_{G1}) e^{\frac{-a(X_{G1} + 0,622)}{0,622} z} + X_{G1} \quad (7 b),$$

$$\frac{\partial X_G(z, 0)}{\partial t} = d (X_{G1} + 0,622)(X_{L0} - X_{G1}) e^{\frac{-a(X_{G1} + 0,622)}{0,622} z} \quad (7 c),$$

$$\frac{\partial T_G(z, 0)}{\partial t} = b (T_{L0} - T_{G0}) e^{-az} + \frac{\sigma X_G(z, 0)}{\sigma t} \quad (7 d).$$

Ausgehend von diesen Anfangswerten und den Randbedingungen gemäß Gl. (6 c) und (6 d) lassen sich nun die Gutsfeuchte und die Gutstemperatur nach den Gleichungen

$$T_{G,k,i+1} = T_{G,k,i} + h \left( \frac{\partial T_G}{\partial t} \right)_{k,i} \quad (8 a)$$

$$X_{G,k,i+1} = X_{G,k,i} + h \left( \frac{\partial X_G}{\partial t} \right)_{k,i} \quad (8 b)$$

bestimmen [7]. Darin bedeuten  $k$  und  $i$  die laufenden Nummern der Rechenschritte in  $z$ - bzw.  $t$ -Richtung und  $h$  die Schrittweite bei der numerischen Integration. Die Berechnung des Feuchtegrads der Luft und der Lufttemperatur hat man von der  $t$ -Achse aus nach den Gleichungen

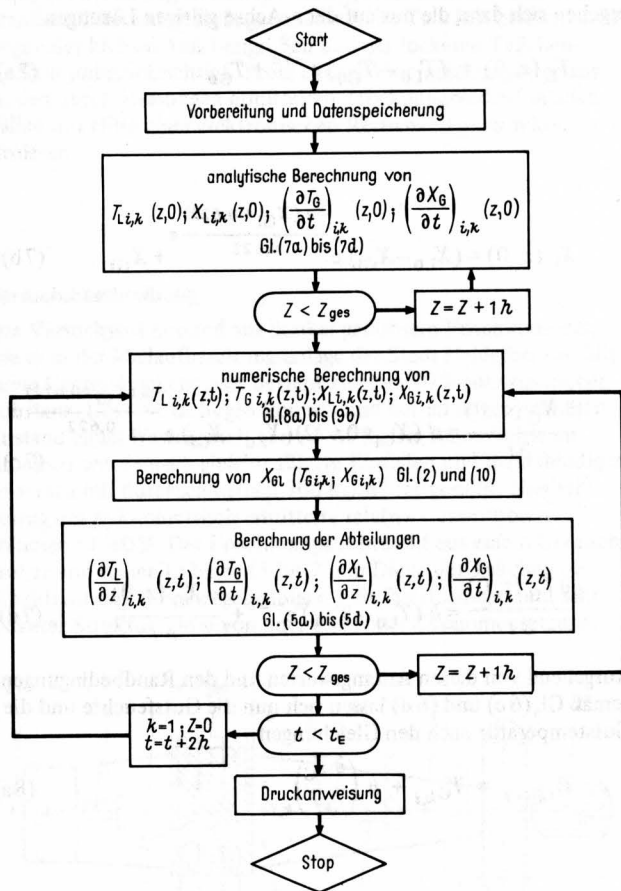
$$T_{L,k+1,i} = T_{L,k,i} + h \left( \frac{\partial T_L}{\partial z} \right)_{k,i} \quad (9 a)$$

$$X_{L,k+1,i} = X_{L,k,i} + h \left( \frac{\partial X_L}{\partial z} \right)_{k,i} \quad (9 b)$$

vorzunehmen. Nachdem nach Gl. (8 a) bis (9 b) die vier Hauptvariablen in einem neuen Punkt errechnet worden sind, lassen sich auch der Feuchtegrad der Grenzschicht nach Gl. (2) sowie sämtliche Ableitungen nach Gl. (5 a) bis (5 d) bestimmen. Das extrapolierende Iterationsverfahren wird nach Erreichen der beliebig wählbaren Schichtdicke  $z$  oder einer vorgegebenen Zeit  $t$  beendet. Der Lösungsweg zum Bestimmen von  $T_G(z, t)$ ,  $X_G(z, t)$ ,  $T_L(z, t)$  und  $X_L(z, t)$  wurde in der Form eines Flußdiagramms in Bild 2 angegeben. Schwierigkeiten im Lösungsvorgang bereiteten Unstabilitätserscheinungen und Konvergenzprobleme vor allem durch unzuverlässig gewählte Schrittgrößen und ungeeignete Integrationsformeln. Um die Rechenkosten, die bei abnehmender Schrittweite erheblich zunehmen, niedrig zu halten, waren langfristige Ausleseverfahren nötig. In einem späteren Beitrag soll auf dieses Problem näher eingegangen werden.

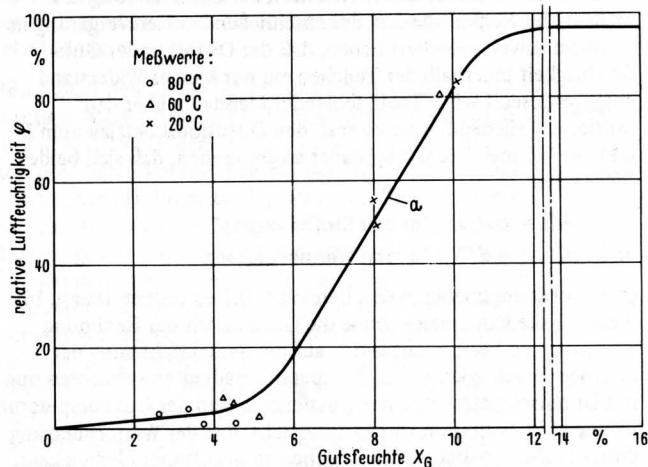
**Bild 2.** Flußdiagramm zur numerischen Lösung von Gl. (5a) bis (5d).

$h$  Schrittweite  
 $i, k$  Schrittnummer in  $t$ - bzw.  $z$ -Richtung  
 $z_{ges}$  Schichtdicke des Gutes in Durchströmrichtung (s. Bild 1)  
 $t_E$  gesamte Trocknungszeit  
 sonstige Erläuterungen im Text



**Bild 3.** Hygroskopisches Gleichgewicht des als Versuchsgut verwendeten Frischkomposts.

a Verlauf nach Gl. (10)



Kontakte der Teilchen in der Schüttung wird jedoch der Zutritt des Trocknungsmediums zu einem Großteil der Teilchen blockiert, so daß die austauschfähige Oberfläche in einem kleineren Größenbereich zu suchen ist. Diese Überlegungen wurden durch eine parametrische Untersuchung des Produkts  $\alpha F$  bestätigt, das schließlich als eine einzige Rechengröße  $\alpha F = 120000 \text{ kcal/m}^3 \text{ hgrd}$  in allen Simulationsbeispielen benutzt wurde. Veränderungen der Raumdichte  $Q_G$ , der spezifischen Wärme  $c_G$ , der Verdunstungswärme  $r$  und des Porenvolumens während der Trocknung berücksichtigte man nicht, da sie nur einen sehr kleinen Einfluß auf die theoretischen Ergebnisse ausüben [3; 4]. Die Luftgeschwindigkeit  $v_L$  und Dichte der Luft  $Q_L$  beziehen sich auf die Eingangsbedingungen vor dem Eintritt in die Heizung. Das Produkt  $Q_L v_L$ , das den spezifischen (flächenbezogenen) Massenfluß des Trocknungsmediums kennzeichnet, wurde während der einzelnen Simulationsverfahren konstant gehalten.

**Die technischen Eigenschaften des Versuchsguts**

Bei der Simulation wurde in Anlehnung an die Werte des Torfbodens mit einer spezifischen Wärme von  $c_G = 0,4 \text{ kcal/kg grd}$  gerechnet und die Verdunstungswärme des gutschwundenen Wassers mit  $r = 600 \text{ kcal/kg}$  in Rechnung gestellt [3; 4]. Die relative Luftfeuchtigkeit in der Grenzschicht ließ sich im Bereich  $0,04 \leq X_G \leq 0,12$  (Trockenbasis) durch die empirisch gefundene Beziehung

$$\varphi = 0,46 \left\{ \cos \left[ \frac{\pi}{8} (100,0 X_G + 4,0) \right] + 1,0 \right\} + 0,04 \quad (10)$$

ausdrücken, Bild 3. Für Gutsfeuchten unter 4,0% (auf Trockenmasse bezogen) gilt  $\varphi = X_G$ . Bei einem Wassergehalt über 13,0% beträgt die Gleichgewichtsfeuchte konstant  $\varphi = 96,0\%$ . Wegen des kleinen Abstands der Sorptionsisothermen voneinander konnte der Einfluß der Gutstemperatur vernachlässigt werden.

Eine exakte Bestimmung der Wärmeübergangszahl  $\alpha$  und der spezifischen austauschfähigen Oberfläche  $F$  war bisher nicht möglich. Torfboden, dessen Dispersität und Zusammensetzung etwa mit den Werten des Frischkomposts vergleichbar sind, hat eine „äußere spezifische Oberfläche“ von rd.  $15 \cdot 10^6 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Dieser Wert bezieht sich auf eine monomolekulare Schichtdicke der an der Oberfläche angelagerten Wassermasse. Wegen des engen

**Theoretische und experimentelle Ergebnisse**

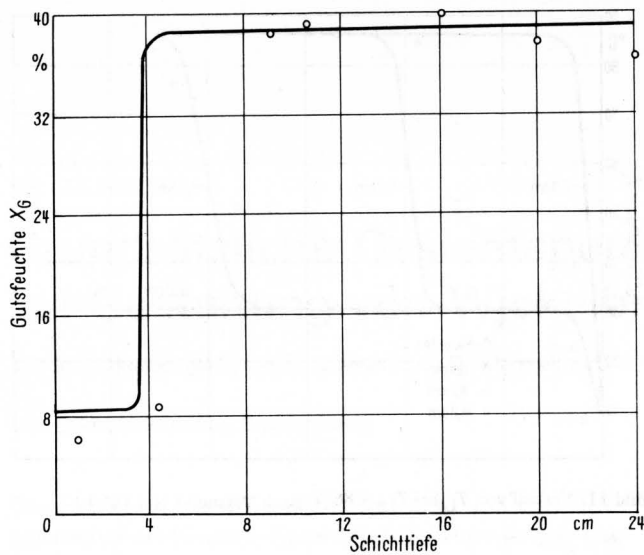
Alle theoretischen Ergebnisse beziehen sich auf die in Tafel 1 angegebenen Trocknungsbedingungen, die bei Versuchen durch Messungen gewonnen wurden. Sie sind daher mit den experimentellen Ergebnissen unmittelbar vergleichbar.

Unmittelbar nach dem Abschluß eines jeden Versuchs ermittelte man durch Probenentnahme in verschiedenen Schichttiefen den Stand der Trocknungszone innerhalb der Schüttung. Diese Versuchswerte, die für die verschiedenen Trocknungsbedingungen

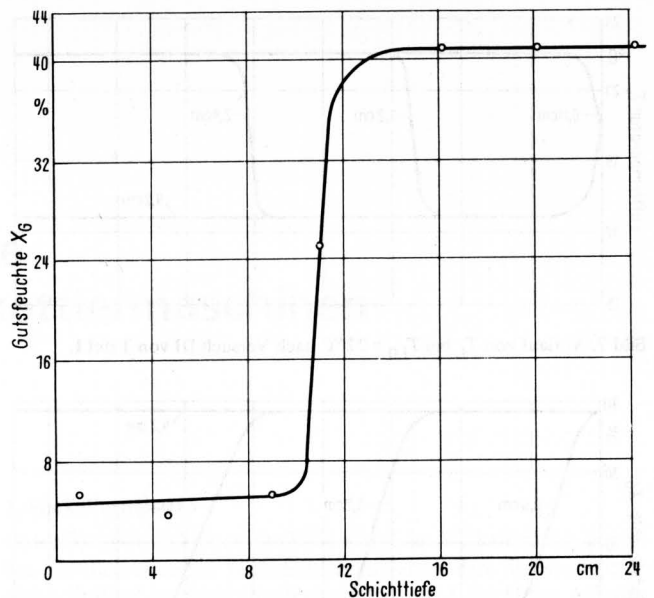
**Tafel 1.** Versuchsbedingungen und Ausgangsdaten der Simulation.

Index 0 für Werte zur Zeit  $t = 0$

Ver-such	Luft-temperatur $T_{L0}$ °C	Luft-feuchtig-keit $X_{L0}$ kg/kg	Guts-temperatur $T_{G0}$ °C	Gutsfeuchte (auf Trockenmasse bezogen) $X_{G0}$ kg/kg	Luft-geschwin-digkeit $v_L$ m/h	Trock-nungs-zeit $t_E$ h
I	86,0	0,0034	6,3	0,585	1970,0	0,75
II	60,0	0,0093	20,7	0,680	2790,0	1,23
III	22,0	0,0098	19,8	0,632	2500,0	2,82



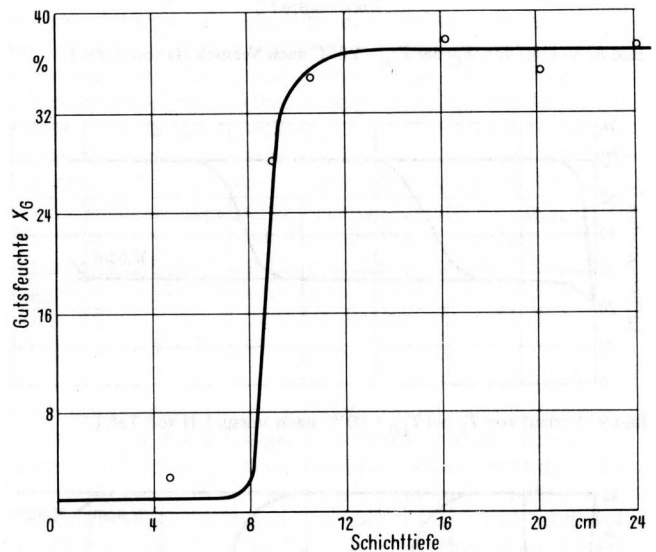
**Bild 4.** Verlauf der Trocknungszone nach Abschluß der Trocknung mit einer Eingangstemperatur von 22 °C.  
Versuch III in Tafel 1



**Bild 5.** Verlauf der Trocknungszone nach Abschluß der Trocknung mit einer Eingangstemperatur von 60 °C.  
Versuch II in Tafel 1

**Bild 4 bis 6.** Vergleich gemessener und nach dem Simulationsverfahren berechneter Trocknungsergebnisse.

Die Punkte geben die Meßwerte wieder; die Kurven entsprechen dem theoretischen Verlauf.



**Bild 6.** Verlauf der Trocknungszone nach Abschluß der Trocknung mit einer Eingangstemperatur von 86 °C.  
Versuch I in Tafel 1

aus **Bild 4 bis 6** hervorgehen, zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit dem jeweils aus der Simulation erhaltenen Kurvenverlauf (ausgezogene Kurve n). Obwohl die Probenentnahme bei jedem Versuch an den gleichen, vorher festgelegten Stellen stattfinden mußte, gelang es in den beiden Versuchen mit angewärmter Luft die Trocknungszone zu treffen und ihre in den Simulationsverfahren berechnete kleine Tiefe zu bestätigen. Bei der Trocknung mit ungewärmter Luft fällt die Lufttemperatur in den einzelnen Schichttiefen der Schüttung zunächst auf Werte unterhalb der anfänglichen Gutstemperatur ab und gleicht sich dann kurz vor Vollendung der Trocknung der jeweiligen Schicht der Eintrittstemperatur der Luft an, **Bild 7 und 8**. Eine Lufterwärmung auf 60 °C hebt die Kühlgrenztemperatur auf ein höheres Niveau. Sie liegt nach der Sättigung in den einzelnen Schichten jetzt oberhalb der anfänglichen Gutstemperatur, **Bild 9 und 10**. Im Fall einer Lufterwärmung auf 86 °C ergibt sich der gleiche Vorgang. In den beiden Versuchen mit vorgewärmter Luft ist

nach dem theoretischen Modell vor dem Anheben der Guts-temperatur auf die Höhe der Kühlgrenztemperatur im ungetrockneten Teil des Guts eine leichte Zunahme der Gutsfeuchte festzustellen, was allerdings wegen des sehr kleinen Ausmaßes von weniger als 1 % (auf das feuchte Gut bezogen) nicht gemessen werden konnte. Die gesättigte Trocknungsluft muß vorübergehend Wärme an das kühlere Material abgeben, so daß sich ihr Taupunkt entsprechend erniedrigt. Als Folge davon kondensiert Wasser aus der Luft aus, das vom Gut aufgenommen wird. Trotzdem bewirkt das Anwärmen der Trocknungsluft eine erhebliche Beschleunigung des Trocknungsvorgangs. Der Fall andauernder Wärmeabgabe an die Umgebung, der zu ernsthaften Kondensationserscheinungen führt, blieb bisher unberücksichtigt. Wegen des hohen Luftwiderstandes wurde in allen Versuchen ein spezifischer Luftdurchsatz von rd. 3 000 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> h (entsprechend 12 000 m<sup>3</sup> Luft je m<sup>3</sup> Frischkompost), bei dem sich ein Druckabfall von insgesamt 635 mm WS ergab, nicht überschritten.

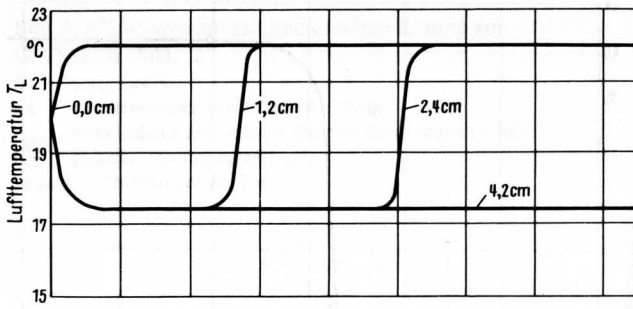


Bild 7. Verlauf von  $T_L$  bei  $T_{LO} = 22^\circ\text{C}$  nach Versuch III von Tafel 1.

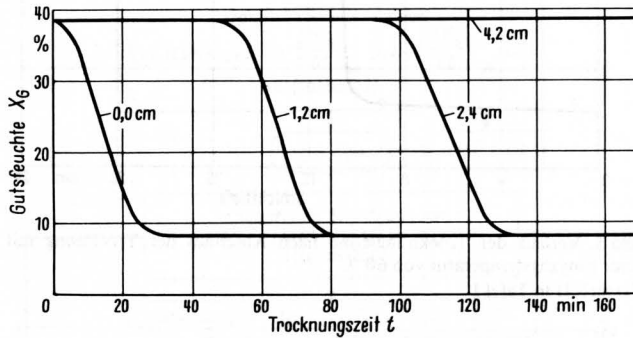


Bild 8. Verlauf von  $X_G$  bei  $T_{LO} = 22^\circ\text{C}$  nach Versuch III von Tafel 1.

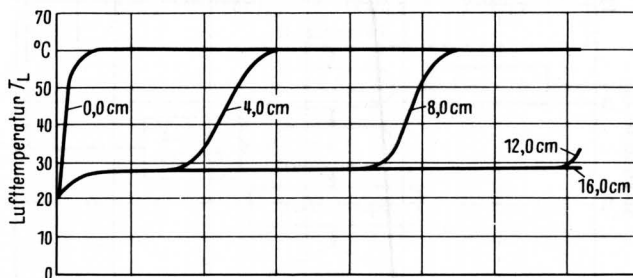


Bild 9. Verlauf von  $T_L$  bei  $T_{LO} = 60^\circ\text{C}$  nach Versuch II von Tafel 1.

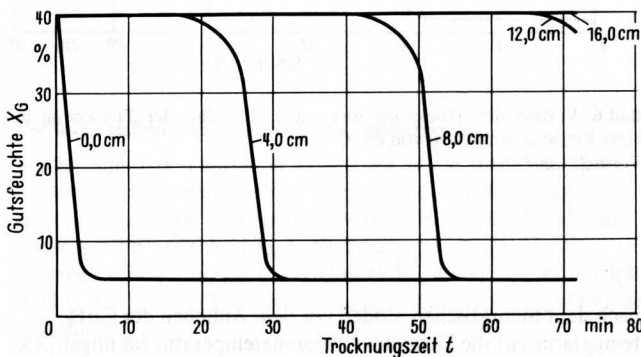


Bild 10. Verlauf von  $X_G$  bei  $T_{LO} = 60^\circ\text{C}$  nach Versuch II von Tafel 1.

Trotz einiger Unvollkommenheiten im beschriebenen Simulationsmodell war es möglich, den Trocknungsvorgang mit sehr guter Genauigkeit zu beschreiben. Falls es gelingt, die mit dem gekoppelten Stoff- und Wärmeaustausch verbundenen Vorgänge der Sorption und der Diffusion zu analysieren, würde der Anwendungsbereich des Modells durch Einschließen weiterer Versuchsgrößen und unterschiedlicher Verfahren erheblich erweitert werden. Die Möglichkeit der Simulation erlaubt aber nicht nur ein wesentliches Beschleunigen von Versuchsprogrammen, sondern infolge ihrer mathematischen Ausdrucksform auch eine Optimierung von Konstruktion und Betrieb.

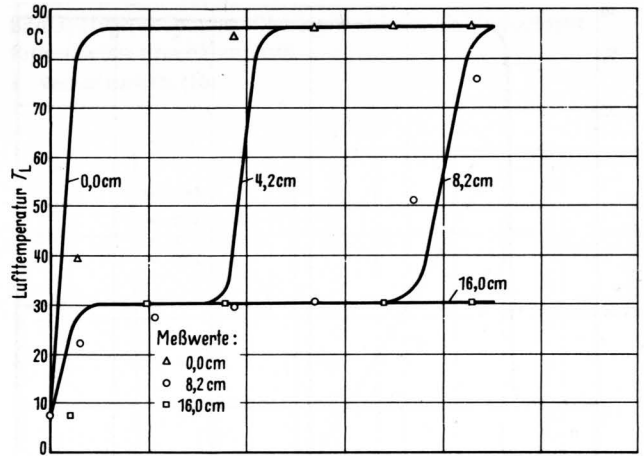


Bild 11. Verlauf von  $T_L$  bei  $T_{LO} = 86^\circ\text{C}$  nach Versuch I von Tafel 1.

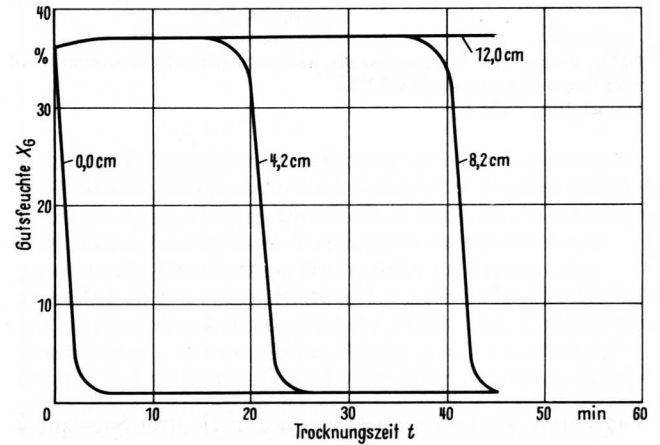


Bild 12. Verlauf von  $X_G$  bei  $T_{LO} = 86^\circ\text{C}$  nach Versuch I von Tafel 1.

Bild 7 bis 12. Zeitlicher Verlauf der Trocknungslufttemperatur  $T_L$  und der Gutsfeuchte  $X_G$  in verschiedener Tiefe der Schüttung bei verschiedenen Eingangstemperaturen  $T_{LO}$  der Luft.

### Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] Klapp, E.: Ein Beitrag zur analytischen Behandlung von gekoppelten Wärme- und Stoffaustauschvorgängen in durchströmten Schüttgütern. Diss. Universität Bonn 1961.
- [2] Klapp, E.: Mathematische Behandlung gekoppelter Wärme- und Stoffaustauschvorgänge in durchströmten Schüttgütern. Ing.-Arch. Bd. 32 (1963) Nr. 5, S. 360/372.
- [3] Bakker-Arkema, F. W.: Gekoppelter Wärme- und Stoffaustausch während des Trocknungsvorganges in einem Behälter mit Getreide. Landtechn. Forsch. (1967) Nr. 6.
- [4] Bakker-Arkema, F. W.: Simultaneous heat and mass transfer during the cooling of a deep bed of biological products under varying inlet air conditions. J. Agric. Engng. Res. Bd. 12 (1967) S. 297.
- [5] ● Holman, J. P.: Heat transfer. New York u. London: Mc Graw-Hill 1963.
- [6] ● Krischer, O., u. K. Kröll: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Bd. 1. Berlin, Göttingen u. Heidelberg: Springer 1956.
- [7] ● Stiefel, E. L.: Einführung in die Numerische Mathematik. Stuttgart: Teubner Verlagsgesellschaft 1963.
- [8] ● Gierling, P.: Untersuchungen zur Aufklärung des Trocknungsverhaltens pflanzlicher Stoffe. VDI-Forsch.-Heft 458. Düsseldorf: VDI-Verlag 1956.