

# Belüftung von Kartoffelschüttungen

Bei der Langzeitlagerung von Kartoffeln ist das wesentliche Ziel, Verluste zu mindern und die Qualität des lagernden Guts zu sichern. Der Verminderung von Masseverlust (Schwund) kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Er lässt sich nach einem Modell der Stoff- und Wärmeaustauschvorgänge zwischen dem Kartoffelstapel und durchströmender Luft berechnen. Dabei können die Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Luftzuständen bei der Belüftung (Temperatur, Feuchte und Luftrate) auf den Temperaturverlauf und den Masseverlust in der Kartoffelschüttung untersucht werden. Ziel ist, die Belüftungsbedingungen vorherzubestimmen, die den Schwund vermindern.

Dr.-Ing. Klaus Gottschalk ist wissenschaftlicher Mitarbeiter beim Institut für Agrartechnik Bornim e.V. ATB, Abteilung Technik der Aufbereitung, Lagerung und Konservierung, Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam; e-mail: kgottschalk@atb-potsdam.de  
**Referierter Beitrag der LANDTECHNIK, die Langfassung erscheint in Bd. 5 der Agrartechnischen Forschung, H. 2/99**

## Schlüsselwörter

Kartoffellager, Klimatisierung, Modellierung

## Keywords

Potato storage, bulk climate control, modeling

Literaturhinweise sind vom Verlag unter LT 99606 erhältlich oder über Internet <http://www.landwirtschaftsverlag.com/landtech/local/fliteratur.htm> abrufbar.

Um die Lufttemperatur, die Kartoffeltemperatur, den Feuchtegehalt der Luft und den Wassergehalt der Kartoffeln zu berechnen, wurde ein thermodynamisches Modell der Stoff- und Wärmeaustauschvorgänge zwischen den Kartoffelschichten und der durchströmenden Luft entwickelt [3, 4]. Nach einem Schichtenmodell (Bild 1) wird die Kartoffelschüttung als ein homogener Stapel aus Schichten mit den Dicken eines typischen Kartoffeldurchmessers, zum Beispiel 60 mm, betrachtet. Der thermodynamische Zustand der Luft und jeder Kartoffelschicht ändert sich unter Stoff- und Wärmeaustauschvorgängen zwischen jeder Schicht und der strömenden Luft. Die Luft strömt dabei gleichförmig durch den Stapel, beispielsweise von unten nach oben. Änderungen der Zustände der Zuluft (vor der ersten Schicht) in Abhängigkeit der Zeit können in der Rechnung berücksichtigt werden.

Der Stoff- und Wärmeaustausch zwischen Luft und jeder Schicht ist beschrieben durch ein System von Gleichungen für den Stoff- oder Wärmeübergang und von Bilanzgleichungen zur Erhaltung der Wärme und der Masse [2]. Die Gleichungen dienen zur Beschreibung von Wärmeerhaltung, Massenerhaltung, Wärmetransport und Stofftransport. Wesentlich zur Anpassung des Modells sind die Gleichungen zum Wärmeübergang:

$$[j_Q]_{\text{Oberfläche}} = \alpha (T_K - T_L)$$

und Stoffübergang:

$$[j_m]_{\text{Oberfläche}} = k (x_K - x)$$

mit:  $T_K$  Kartoffeltemperatur,  $T_L$  Lufttemperatur,  $x$  Feuchtegrad der Luft,  $x_K$  Feuchtegrad der Luft bei Kartoffeltemperatur und  $j_Q$  beziehungsweise  $j_m$  Massenflussdichte für Wärme- und Stofftransport durch die Kartoffeloberfläche.

Aufgabe bei der Validierung des Modells ist die Identifikation des Stoffübergangskoeffizienten  $k$  und des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_0$  über die Reynoldszahl

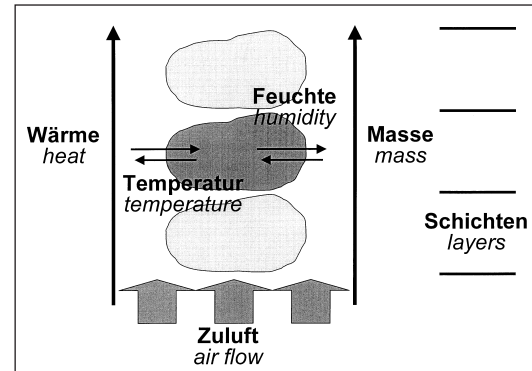


Bild 1: Schichtenmodell der Kartoffelschüttung zum Stoff- und Wärmeaustausch

Fig. 1: Layer model of potato bulk for heat and mass transfer

$Re = w \cdot d_K / \nu$  und die Nusseltzahl bei der Durchströmung von porösem Schüttgut (aus [1])

$Nu = \alpha \cdot s / \lambda$  wird der Einfluss der Luftrate und Luftgeschwindigkeit auf den Wärmeübergang modelliert:

$$\alpha = \alpha_0 \cdot 0,61 \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\lambda \cdot w^{2/3}}{d_K^{1/3} \cdot \nu^{2/3}} \quad (\text{Wärmeübergangskoeffizient})$$

mit

$$w = \frac{\dot{m}_L}{\rho_L \cdot A_L} \quad (\text{Luftgeschwindigkeit})$$

Dabei ist  $s = d_K \cdot \pi / 2$  der Weg der Luftströmung um eine Hälfte der Kartoffeloberfläche,  $\dot{m}_L$  Massefluss der Luft (entsprechend der Luftrate),  $\rho_L$  Massendichte der Luft und  $A_L$  Querschnittsfläche des Silos.

Hinzu kommen Gleichungen zur Berücksichtigung der Verdampfungs- oder der Kondensationsvorgänge und zur Berechnung des Feuchtegrads der Luft.

Das Modell erlaubt die instationäre Berechnung der Temperaturen und Feuchte über eine beliebig lang gewählte Belüftungszeit, in Abhängigkeit des (eventuell instationären) Zustands und der Rate der Zuluft. Der Zuluftzustand (Temperatur und Feuchtegehalt) kann somit als konstant oder

Tab. 1: Gegenüberstellung des Schwunds nach Ende der Belüftungszeit aus Versuch und Simulation

Table 1: Mass loss after the ventilation period; comparing the experiment with the simulation

Schwund in %		Erste Schicht	Letzte Schicht	Mittlere Schicht	Mittelwert	Min	Max
Abkühlen	Messung	0,25	0,43	0,41	0,36	0,16	0,70
	Simulation	0,38	0,22	0,30	0,30	0,22	0,38
Aufwärmen	Messung	2,40	2,60	2,45	2,49	2,16	2,80
	Simulation	1,13	1,09	1,10	1,10	1,09	1,13

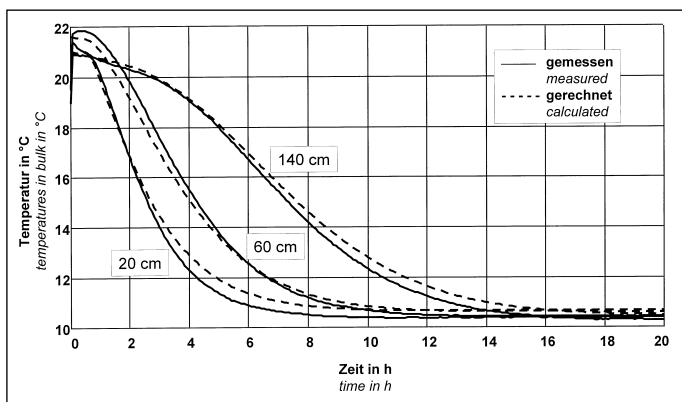
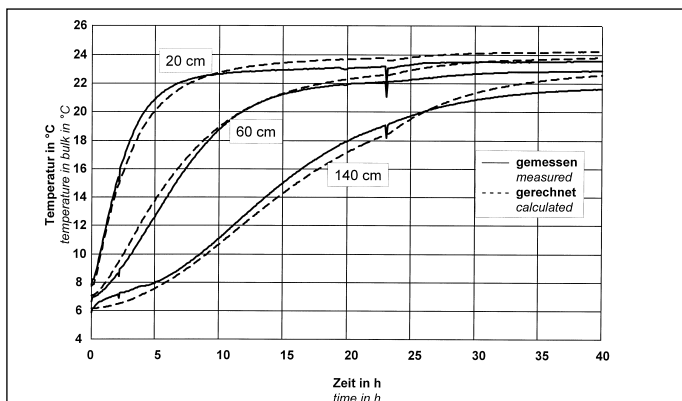


Bild 2: Verlauf der Temperaturen in der Kartoffelschüttung beim Abkühlen

Fig. 2: Course of temperatures in the potato bulk during cooling down



auch aus realen Wetterdaten vorgegeben werden.

### Belüftungsversuch

Zur Verifizierung des Modells wurde ein Belüftungs-Versuchsstand für die Getreidetrocknung des Instituts genutzt, um eine Probe von Kartoffeln unter definierten Bedingungen zu belüften. Das Silo des Versuchsstands wurde hierzu mit 65 Beuteln Kartoffeln zu je etwa 5 kg Masse auf eine Höhe von etwa 130 cm befüllt (s. Bild 2, S. 325). Die Beutel wurden vor und nach jedem Versuch einzeln ausgewogen, um den Masseverlust (Schwund) zu bestimmen. Eine Anzahl von Temperaturfühlern in unterschiedlichen Höhen erlaubten die Erfassung der Temperaturen in der Kartoffelschüttung für verschiedene Höhen. Während der Versuche wurden zusätzlich jeweils die Feuchte und Temperatur der Zuluft und Abluft sowie die Luftgeschwindigkeit im Zuluftrohr in festen zeitlichen Abständen erfasst. Zwei Versuche wurden durchgeführt: erstens zum Aufwärmen und zweitens zum Abkühlen der Kartoffeln. Beide Versuche wurden unter voreingestellten und konstant gehaltenen Zuluftbedingungen durchgeführt, und zwar: beim Aufwärmen:

Temperatur der Zuluft: 24,5 °C, konstant  
Feuchte der Zuluft: 21 %, konstant  
Schütthöhe: 1,3 m

beim Abkühlen:

Temperatur der Zuluft: 10,5 °C, konstant  
Feuchte der Zuluft: 50 %, konstant  
Schütthöhe: 1,2 m

### Kartoffelsorte:

Adretta, TS-Gehalt: 18,2 bis 24,2 %  
Gesamtmasse vor dem Versuch Aufwärmen: 325 kg  
Gesamtmasse vor dem Versuch Abkühlen: 317 kg

### Luftgeschwindigkeit durch die Schüttung:

$w = 0,05 \text{ m/s}$ , konstant für beide Versuche  
Nach Identifikation der Koeffizienten zum Stoff- und Wärmeübergang  $k$  und  $\alpha$ , gelang eine gute Übereinstimmung der Modellrechnung mit den Versuchen bezüglich der Temperaturverläufe in den Schichten (Bild 2, 3). Dabei wurde der Stoffübergangskoeffizient  $k$  zu  $k = 0,00144 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  identifiziert. Der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  musste mit dem Faktor  $\alpha_0 = 1,9$  korrigiert werden.

### Ergebnisse

Beim Aufwärm-Versuch zeigen sich deutliche Abweichungen des Schwunds zwischen Versuch und Simulation, während beim Abkühl-Versuch gute Übereinstimmung besteht (Tab. 1). Die höhere Transpiration durch verstärkte biologische Aktivität von warmen Kartoffeln ist noch nicht ausreichend modelliert. Dennoch ist

Bild 5: Schwund in Abhängigkeit der Lufrate und der relativen Feuchte der Zuluft beim Abkühlen

Fig. 5: Mass loss dependent on airflow-rate and rel. humidity of the inlet air during cooling down

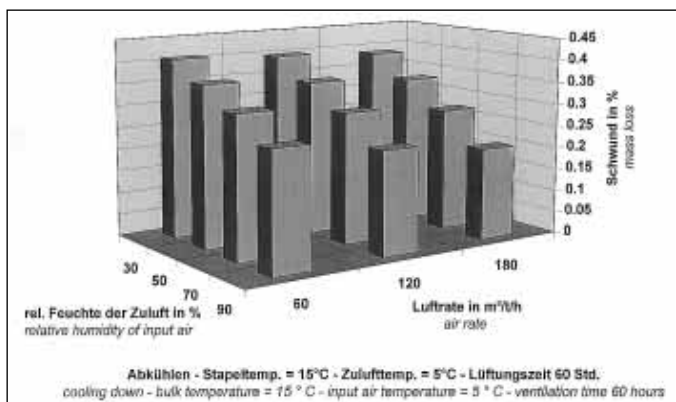


Bild 4: Schwund in Abhängigkeit der Lufrate und der relativen Feuchte der Zuluft beim Aufwärmen

Fig. 4: Mass loss dependent on airflow-rate and rel. humidity of the inlet air during warming up

Bild 3: Verlauf der Temperaturen in der Kartoffelschüttung beim Aufwärmen

Fig. 3: Course of temperatures in the potato bulk during warming up

auch bei der Simulation der Effekt zu erkennen, dass beim Aufwärmen ein deutlich höherer Schwund auftritt als beim Abkühlen. In der obersten Schicht lag der Schwund bei beiden Versuchen höher als in den darunter liegenden Schichten. Dies könnte auf den Kontakt mit der umgebenden Luft über der Schüttungsfläche zurückzuführen sein.

Ausgehend von dieser Modellanpassung sind Rechnungen möglich, unter verschiedenen Zuluftbedingungen den Schwund vorherzubestimmen. Dabei stellte sich die Frage, inwieweit die Variation der Lufrate einerseits und die Variation der rel. Feuchte der Zuluft Einfluss auf den Masseverlust (Schwund) hat. Der Schwund lag nach dem Aufwärmen deutlich über dem Schwund nach dem Abkühlen. Dieser Effekt ist auf das höhere Aufnahmevermögen für Wasserdampf von warmer Luft zurückzuführen.

### Belüftung von Kartoffelschüttungen

Durch Nutzung feuchter Zuluft können die Verluste durch Schwund stark reduziert werden (Bild 4, 5). Beim Aufwärmen ist der Schwund höher als beim Abkühlen und nimmt zudem stark mit der Lufrate zu (Bild 6). Außerdem ist beim Aufwärmen mit zu hohen Temperaturdifferenzen zwischen warmer Zuluft und kalten Kartoffeln die Neigung zur Kondensation bei hoher relativer Feuchte der Zuluft besonders in den unteren Schichten nicht zu vermeiden (Kondensationseffekt in Bild 6 hervorgehoben). Beim Abkühlen ist dagegen der auch bei Praktikern bekannte Effekt erkennbar, dass hohe Lufraten den Schwund vermindern (Bild 4).

