

Klaus Gottschalk

Oberflächen-Abtrocknung von Früchten und Kartoffeln

Die rechtzeitige Abtrocknung der Oberfläche von Früchten und Kartoffeln, die mit einem Wasserfilm behaftet sind, ist eine Maßnahme zur Verhinderung der Ausbreitung von Mikroorganismen. Die Transpiration ist ein nicht-adiabatischer Vorgang, der sich aus den Wärme- und Stofftransportgleichungen unter Einbeziehung der Übergänge von der Grenzschicht zur strömenden Luft mit guter Übereinstimmung berechnen lässt. Durch Messungen mittels einer Infrarot-Thermokamera lassen sich die Verteilung der Oberflächentemperaturen auf der Fruchtoberfläche messen, der Abtrocknungsvorgang verfolgen und die Übergangskoeffizienten abschätzen.

Schlüsselwörter

Oberflächenfeuchte, Abtrocknung von Früchten und Kartoffeln

Keywords

Surface moist, surface drying of fruit and potatoes

Abstract

Gottschalk, Klaus

Surface drying of fruit and potatoes

Landtechnik 66 (2011), no. 1, pp. 26-29, 4 figures, 4 references

It is evident to dry off surface moist from fruit and potatoes to prevent microbial activities which is a risk for spread of diseases. The process of surface drying is determined by the evaporation cooling effect along the surface. Local flow and transfer effects can be determined. Respecting heat and mass exchange in the boundary, the temperature profile around the surface of the produce can be calculated during drying off moist from the fruit surface. The fruit surface temperature is visualized by image analysis of infrared-thermographic images.

■ Haftwasser an der Oberfläche von Früchten und Kartoffeln birgt das Risiko der Bildung und Ausbreitung von Mikroorganismen, was eine wesentliche Beeinträchtigung der Lagerfähigkeit und -dauer bedeutet. Daher ist es wichtig, feuchtes Lagergut vor der Einlagerung abzutrocknen bzw. auskondensiertes Wasser zu entfernen. Oberflächenhaftwasser liegt vor, wenn auf der Oberfläche der Frucht ein Wasserfilm vorhanden ist. Das Haftwasser sollte so rasch wie möglich in die umge-

bene Luft verdunsten und abgeführt werden (Transpiration). Die Transportprozesse sind Wärmeleitung bzw. Diffusion von Wasserdampf in Luft sowie Konvektion in strömender Luft. Der wesentliche Vorgang bei der Abtrocknung ist der Stoffübergang, d. h. der Übergang von Wasserdampf von der Oberfläche durch die Grenzschicht der einzelnen Frucht an die umgebende bzw. vorbeiströmende Luft. Analog zu diesem Vorgang geht der Wärmeübergang vonstatten.

Wichtige Parameter zum Abtrocknungsprozess sind daher der Stoffübergangskoeffizient und der Wärmeübergangskoeffizient sowie die Parameter zur Bestimmung des thermodynamischen Zustands der Umgebungsluft, wie Temperatur, Feuchte und Strömungsgeschwindigkeit.

Transpiration

Ein analytisches Modell erlaubt die Berechnung des Masseverlustes E während der Transpiration. E kann durch Wägung festgestellt und nach Gleichung 1 errechnet werden [1]

$$E = \frac{m_0 - m_1}{A \cdot (t_1 - t_0)} \quad (\text{Gl. 1})$$

mit A = Gutoberfläche, m = Masse des Haftwassers, t = Zeit und Index 0 zu Beginn sowie Index 1 zum Ende des Versuchs. Der Masseverlust E kann mit der Massestromdichte j identifiziert werden, also $j \equiv E$. Die Grundgleichung zur Ermittlung der Massestromdichte ist

$$j = -D \text{ grad } Y \quad (\text{Gl. 2})$$

mit D = Diffusionskoeffizient von Wasserdampf in Luft ($D = 25.6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), Y = absolute Feuchte bzw. Beladung der Luft mit Wasserdampf, $Y = m_{\text{feuchte Luft}} / m_{\text{trockene Luft}}$. Die Beladung der Luft kann aus dem Mollier-Diagramm (h-x-Diagramm) entnommen werden.

Luftströmung

Bei der Konvektion ist neben der Lufttemperatur, der Oberflächentemperatur und der Luftfeuchte noch die Geschwindigkeit der an der Oberfläche vorbeiströmenden Luft von Bedeutung. Die Luftgeschwindigkeit kann z. B. mittels eines Hitzedrahtanemometers in der Nähe der Oberfläche (Grenzschicht) gemessen oder durch Strömungssimulation mittels der Numerischen Strömungsmechanik (CFD = Computational Fluid Dynamic) berechnet werden [2].

Zur besseren Übertragbarkeit von Ergebnissen sind dimensionslose Kennzahlen gebräuchlich; für die Strömungsgeschwindigkeit w (in $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) wird die Reynoldszahl ($\text{Re} = w \cdot 2R \cdot \nu^{-1}$) verwendet, mit R =Fruchtkörperradius ($R=35\text{ mm}$), ν =kinematische Viskosität von Luft, $\nu = 15,58 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ bei $25\text{ }^\circ\text{C}$ und 1 bar.

Die Reynoldszahl ist also der Strömungsgeschwindigkeit proportional und längs des Strömungsweges um den annähernd kugelförmig angenommenen Fruchtkörper nicht konstant. Eine ‚lokal-variable‘ Reynoldszahl kann somit definiert und dargestellt werden (**Abbildung 1**). Bei kugelförmigen oder zylinderförmigen Objekten innerhalb einer gleichmäßigen laminaren Parallelströmung verläuft das Strömungsprofil symmetrisch um den Körper.

Im Staupunkt (Luvseite des Objekts) ist die Geschwindigkeit Null, nimmt im Verlauf um den Körper zu, erreicht nahe im Zenit ein Maximum und nimmt leeseitig wieder ab. In der Leeseite entsteht abhängig von der Anströmgeschwindigkeit (bzw. Reynoldszahl) entweder eine laminare Von-Kármánsche Wirbelstraße oder eine turbulente Nachströmung.

In einem thermographischen Temperaturbild kann der Abtrocknungsvorgang beobachtet werden (**Abbildung 2**). Luvseitig trocknet die oberflächennasse Frucht zuerst ab. Eine Trocknungszone wandert mit der Zeit von der Stirnseite (Luv) der Frucht zur Leeseite. Die Art des Verlaufs kann so interpretiert

werden: die Luft in der Grenzschicht sättigt sich sofort mit Wasserdampf und vermag im weiteren Verlauf um den Körper die Frucht nicht weiter abzutrocknen. Erst wenn die Oberfläche an der Stirnseite abgetrocknet ist, kann die Trocknungszone in Richtung der Strömung an der Oberfläche weiterwandern.

Temperaturprofil

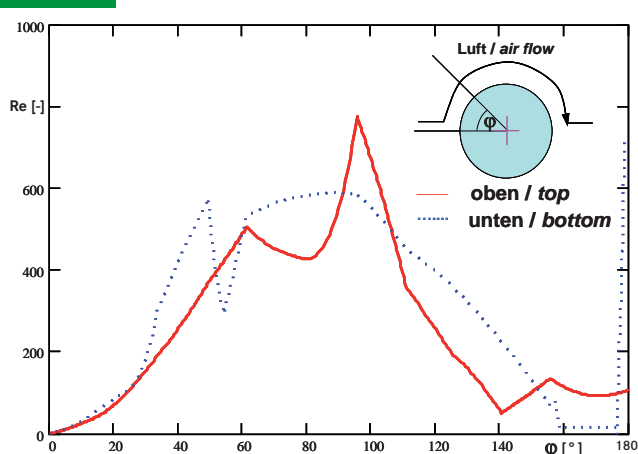
Die Vorgänge beim Stoffübergang sind mit den thermischen Vorgängen gekoppelt. Die Wasserdampfaufnahme der strömenden Luft ist, entsprechend der Beladung Y_s , nur bis zu ihrer Sättigung bei 100 % relative Luftfeuchte (rF) möglich. Die Sättigungsgrenze nimmt mit steigender Lufttemperatur zu (Mollier-Diagramm). Die Luft an der Oberfläche der Frucht – also in der Grenzschicht – ist bis zum Ende der Transpiration stets gesättigt. Während der Transpiration kühlt sich das Haftwasser (Oberflächenwasser) bis zur Kühlgrenztemperatur (Feuchtkugelttemperatur) ab. Dieser Effekt kann für eine Verdunstungskühlung ausgenutzt werden und ist z. B. im Temperaturbild einer Thermographiekamera (**Abbildungen 2 und 3**) gut zu erkennen. Zur Ausbildung des Temperaturprofils um den Körper ist der Wärmeaustausch zwischen Körperoberfläche und Umgebungsluft maßgebend.

Die Kühlgrenztemperatur θ_s lässt sich, z. B. nach [3], berechnen aus

$$\theta_{\text{amb}} - \theta_s = \frac{\Delta h_v(\theta_s) \cdot (Y_s(\theta_s) - Y_s(\theta_{\text{amb}})) \cdot rH}{c_{pg} + Y \cdot c_{pv}} \quad (\text{Gl. 3})$$

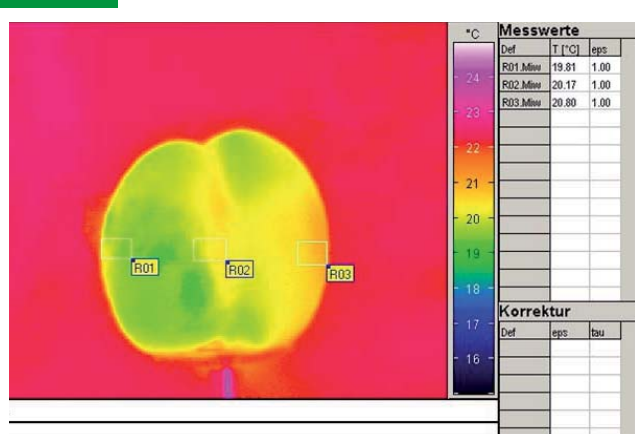
mit θ_{amb} = Umgebungstemperatur, $rH = rF = \text{rel. Luftfeuchte}$, c_{pg} und c_{pv} spez. = Wärmekapazitäten von Luft und Wasserdampf und Δh_v = Verdampfungsenthalpie. Da Gleichung 3 implizit bezüglich θ_s ist, muss sie numerisch, z. B. mittels Regula Falsi, berechnet werden, θ wird in $^\circ\text{C}$ und T in K angegeben.

Abb. 1



Gemessener Verlauf der Reynoldszahl längs einer Pfirsich-Oberfläche; durchgezogen: oberhalb, gestrichelt: unterhalb der Frucht
Fig. 1: Measured proceed of Reynold's number of the air flow along a peach fruit surface; solid line: along upper half, dashed line: along lower half of fruit

Abb. 2



Temperaturverteilung auf Pfirsichoberfläche während der Abtrocknung, gemessen mit Thermographie-Kamera, Messpunkte R01, R02 und R03

Fig. 2: Temperature distribution on the surface of a peach during drying off surface moisture using infrared thermography, measuring points R01, R02 und R03

Wärmeübergang

Die Methoden zur Berechnung der Wärmeübergänge sind analog zu denen der Stoffübergänge. Die dimensionslose Wärmeübergangszahl $Nu = \alpha \cdot \delta_T / \lambda$ (Nusselt-Zahl) ist zur dimensionslosen Stoffübergangszahl Sh (Sherwood-Zahl) analog. Für ein laminar umströmtes kugelförmiges Objekt gilt [3]

$$Nu = 0.664 Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \tag{Gl. 4}$$

mit λ = Wärmeleitfähigkeit von Luft, δ_T = Temperatur-Grenzschichtdicke und Pr = Prandtl-Zahl. Bei Gasen wie der Luft ist $Pr \approx 0,7$. Bei den hier vorkommenden geringen Geschwindigkeitsbereichen wird eine laminare Umströmung angenommen.

Die Wärme- und Stoffaustauschvorgänge sind gekoppelt, was durch die Lewis-Zahl

$$Le = a / D = Sc / Pr \tag{Gl. 5}$$

mit $a = \lambda_{Luft} \cdot \rho^{-1} \cdot c_{pg}^{-1}$ Temperaturleitfähigkeit und D = Stoffdiffusionskoeffizient zum Ausdruck kommt. Die Lewis-Zahl für Wasserdampf in Luft ist $Le \approx 0,87$.

Die Wärmeübergangszahl α ist definiert als

$$\alpha = -\lambda_{Luft} \cdot (\partial T / \partial r)_{Oberfl} / (T_{s0} - T_{\delta T}) \tag{Gl. 6}$$

mit T_{s0} = Oberflächentemperatur bei Sättigung, $T_{\delta T}$ = Temperatur an der thermischen Grenzschichtdicke, r = radialer Abstand und λ = Wärmeleitfähigkeit. Sie lässt sich aus der Steigung der Tangente des Temperaturprofils innerhalb der Grenzschicht im Abstand von der Oberfläche ermitteln. Dazu muss das Temperaturprofil im radialen Abstand vorliegen, was jedoch schwierig zu ermitteln ist. Allerdings kann die thermische Grenzschichtdicke δ_T mit der Grenzschichtdicke δ des Stoffübergangs abgeschätzt werden, also $\delta_T \approx \delta$. Die Grenzschichtdicke δ kann aus der Steigung des gemessenen Geschwindigkeitsprofils im radialen Abstand von der Oberfläche gewonnen werden.

Die Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten α von der Luftströmungsgeschwindigkeit ($w = 0.01$ bis $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) kann nach [4]

$$\alpha = 7.8 \cdot \frac{w^{0.6}}{d^{0.4}} \tag{Gl. 7}$$

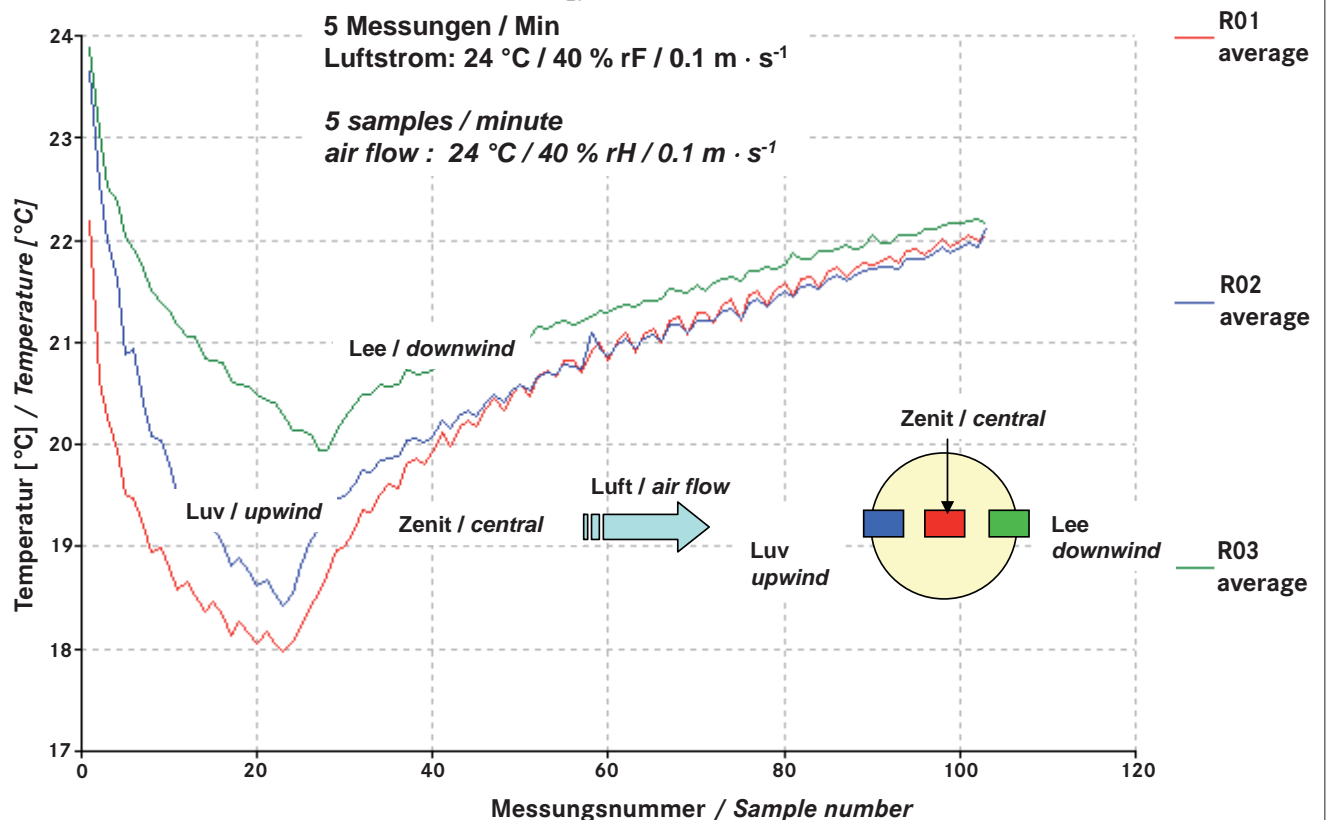
berechnet werden, mit $d = 2 R$ = Fruchtdurchmesser.

Stoffübergang

Der Stoffübergangskoeffizient β ist analog zum Wärmeübergangskoeffizienten α

$$\beta = -D \cdot (\partial Y / \partial r)_{Oberfl} / (Y_{s0} - Y_{\delta}) \tag{Gl. 8}$$

Abb. 3



Thermographisch gemessene Temperaturverläufe an drei Messpunkten auf Pfirsichoberfläche während der Abtrocknung
Fig. 3: Thermographic measurement of temperature at three local points on the surface of a peach during drying off surface moisture

mit r = radialer Abstand von der Oberfläche, Y_{s0} = Beladung am Sättigungspunkt und Y_{δ} an der Grenzschichtdicke δ .

Die Kopplung mit dem Wärmeübergang kommt wieder durch

$$\beta = Le^m \cdot \frac{D \cdot \alpha}{\lambda} \quad (\text{Gl. 9})$$

zum Ausdruck. Bei Gasen ist $m \approx 1/3$.

Die Massestromdichte j wird aus (Gleichung 2)

$$j = \beta \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot (Y_{s0} - Y_{\delta}) \quad (\text{Gl. 10})$$

berechnet. Die Beladung Y_{δ} an der Grenzschichtdicke kann durch die Beladung Y_{amb} bei ausreichend großer Entfernung zur Oberfläche – also in der Umgebung – ersetzt werden. Diese Größe kann aus der Temperatur, der relative Luftfeuchte und aus dem Mollier-Diagramm (h - x -Diagramm) für Wasserdampf in Luft ermittelt werden.

Ergebnisse

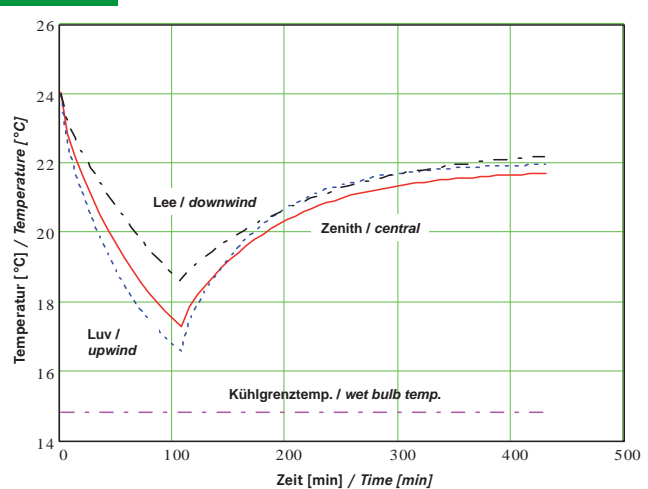
Bei adiabatischer Verdunstungskühlung wird die Kühlgrenztemperatur an der Oberfläche erreicht. Eine thermographische Aufnahme (**Abbildung 3**) zeigt jedoch, dass diese Temperatur in der Realität nicht erreicht wird, sondern immer oberhalb von ihr bleibt. Dies bedeutet, dass Wärme aus dem Inneren der Frucht an die Oberfläche geleitet wird und der Vorgang demzufolge nicht-adiabatisch ist. Der Wärmetransport im Inneren der kugelförmigen Frucht lässt sich nach der klassischen Fourierschen Methode aus der Wärmeleitungsgleichung für Kugeln berechnen, z. B. [3]. Weiterhin findet ein Wärmetransport innerhalb der Grenzschicht statt, wobei die Temperatur nur zwischen den Grenzen der minimal erreichbaren Kühlgrenztemperatur θ_s nahe der Oberfläche bzw. auf dem Wasserfilm sowie der maximal erreichbaren Umgebungstemperatur $\theta_{\text{amb}} \approx \theta_{\text{OT}}$ liegen kann. Durch den Wärmeaustausch mit dem Körper stellt sich eine messbare Temperatur ein, die zwischen θ_s und θ_{amb} liegt. Der Wärmeübergang ist von der Luftströmungsgeschwindigkeit nach Gleichung 7 abhängig. Er ist daher lokal längs der Körperoberfläche unterschiedlich, weil die Geschwindigkeit bzw. die (lokale) Reynolds-Zahl unterschiedlich sind. Die Berechnung der Oberflächentemperatur nach der oben erläuterten Methode, insbesondere mit Gleichung 3, und der Fourierschen Lösung der Wärmeleitungsgleichung für Kugeln ergibt zu dem Beispiel nach **Abbildung 3** eine gute Übereinstimmung (**Abbildung 4**).

Aus den Gleichungen 7 bis 9 wurde $\beta \approx 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bei $w = 0,15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $D = 26,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $\lambda_{\text{Luft}} = 0,026 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ermittelt. Aus Messungen des Strömungsgeschwindigkeitsprofils mittels eines Hitzedrahtanemometers wurde $D_{\text{Luft}}/\beta = \delta/\text{Sh} \approx (1,20 \text{ bis } 1,22) \cdot R$ ermittelt. Die Sherwood-Zahl ist analog zur Nusselt-Zahl

$$\text{Sh} = 0,644 \text{ Re}^{1/2} \cdot \text{Sc}^{1/3} \quad (\text{Gl. 11})$$

für kugelförmige Körper. Die Schmidt-Zahl ist $\text{Sc} = \nu/D$.

Abb. 4



Berechnete Temperaturverläufe an drei Messpunkten auf Pfirsichoberfläche während der Abtrocknung

Fig. 4: Calculated proceed of temperature at three local points on the surface of a peach during drying off surface moisture

Im Beispiel (**Abbildungen 3 und 4**) wurde die Oberfläche einer Frucht mit einem Wasserfilm von 80 μm Dicke innerhalb $\frac{1}{2}$ h mit Luft bei 24 °C und 40 % rF abgetrocknet. Der Masseverlust infolge Transpiration war $E = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ (Gleichung 1). Die Rechnung nach Gleichung 10 ergab $j = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, was eine gute Übereinstimmung zum Experiment (E) bei Annahme von $\beta \approx 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ergibt.

Schlussfolgerungen

Der vornehmliche Effekt während der Transpiration ist der Stoff- und Wärmedurchgang durch eine Frucht und durch deren Grenzschicht sowie der Stoff- und Wärmeübergang von der Grenzschicht an die Strömungsluft. Dieser Vorgang ist nicht-adiabatisch, weshalb die theoretische Kühlgrenztemperatur während der Verdampfung von Oberflächen-(Haft-)Wasser nicht erreicht wird, solange Wärme aus dem Inneren der Frucht nachgeleitet wird. Die einfache Analyse der Wärme- und Stofftransportvorgänge in Verbindung mit der Wärmeleitung in der Frucht und der Übergangskoeffizienten ergibt eine gute Übereinstimmung der Berechnung der Oberflächentemperatur mit der thermographisch ermittelten Oberflächen-Temperaturverteilung.

Literatur

- [1] Linke, M. (1997): Modelling and predicting the postharvest behaviour of fresh vegetables. Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture, Eds. Munack and Tantau, Oxford, Pergamon Press, UK, pp. 283-288
- [2] Gottschalk, K.; Linke, M.; Mészáros, C.; Farkas, I. (2007): Modelling condensation and evaporation on fruit surface. Drying Technology 25, pp. 1237-1242
- [3] Baehr H. D., Stephan, K. (1996). Heat and Mass Transfer. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- [4] Rastovski, A (1987): Storage of Potatoes. Eds. Rastovski, A., van Es, A. et al, Wageningen, Pudoc

Autor

Prof. Dr.-Ing. Klaus Gottschalk ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB), Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam, E-Mail: kgottschalk@atb-potsdam.de