

Teodor Teodorov, Holger Scaar, Fabian Weigler und Jochen Mellmann

# Berechnung des Schüttgutmassenstroms in Dächerschachttrocknern

Dächerschachttrockner werden in verschiedenen Bauarten als Umlauf- oder Durchlauftrockner hergestellt und vorwiegend zur Getreidetrocknung eingesetzt. Zur Auslegung und Regelung des Trockners ist die Kenntnis des Schüttgutmassenstroms von entscheidender Bedeutung. Berechnungsgrundlagen dafür sind aus der Literatur bisher nicht bekannt. Ziel dieser Arbeit war die Herleitung entsprechender Grundlagen. Basierend auf Experimenten zur Durchflusscharakteristik an einem Versuchstrockner mit Schubaustrageinrichtung wurden Gleichungen zum Schüttgutmassenstrom für den kontinuierlichen und diskontinuierlichen Betrieb entwickelt.

## Schlüsselwörter

Dächerschachttrockner, Getreide, Schüttgutmassenstrom, pneumatischer Schubaustrag

## Keywords

Mixed-flow dryer, grain, solids mass flow rate, pneumatic discharge gate

## Abstract

Teodorov, Teodor; Scaar, Holger; Weigler, Fabian and Mellmann, Jochen

Prediction of the solids mass flow rate in mixed-flow dryers

Landtechnik 66 (2011), no. 6, pp. 410–413, 4 figures, 9 references

Mixed-flow dryers are delivered in various modes of recirculation or through-flow dryers and predominantly used for grain drying. To design and control the dryer, the knowledge of the solids mass flow rate or discharge rate is essential. Fundamentals for its calculation are not known from the literature so far. Hence, this work was aimed to derive appropriate fundamentals. Based on experiments on the discharge characteristic at a test dryer equipped with a discharge gate, equations for the solids mass flow rate for the continuous and the interrupted mode of operation were developed, respectively.

■ Dächerschachttrockner kommen meist dann zum Einsatz, wenn große Mengen an Getreide sowie Mais und Reis haltbar gemacht werden müssen [1]. Bereits geringe Veränderungen der Getreideeigenschaften oder der Prozessparameter nehmen

großen Einfluss auf die Qualität des getrockneten Produktes. Die Entwicklung von Dächerschachttrocknern beschäftigt die Wissenschaft daher schon seit Jahrzehnten [2–4]. Obwohl der Prozess der Warmlufttrocknung bereits umfangreich untersucht wurde und Stand der Technik bei der konvektiven Getreidetrocknung ist, besteht noch immer sehr großes Innovationspotenzial hinsichtlich der Beschreibung des Prozesses, aber vor allem in der konstruktiven Gestaltung der zur Trocknung verwendeten Apparate. Neben der Form und Geometrie der Luftkanäle für Zu- und Abluft, deren Anordnung im Trocknerschacht und der damit verbundenen Luftstromführung wird der Trocknungsprozess auch durch die Art und Gestaltung der Austrageinrichtung bestimmt.

Zum Austrag der getrockneten Körner werden in Dächerschachttrocknern vorwiegend Schubaustrageinrichtungen unterschiedlicher Bauart eingesetzt [1]. Neuere Trockner sind meist mit pneumatisch betriebenen Schubböden ausgestattet, wobei Getriebemotor und Exzenter durch Pneumatikzylinder ersetzt wurden. Mithilfe des Pneumatikzylinders wird der Schubboden in vorgegebenen Zeitintervallen soweit verschoben, dass das Gut aus der Auslaufrinne frei austreten kann. Aufgrund der Größe des Trocknerquerschnittes werden bei Dächerschachttrocknern mehrere Auslaufrinnen nebeneinander angeordnet. Die Öffnungsfläche der Auslaufrinnen variiert zwischen 30 und 40 % des Trocknerquerschnitts [1]. Schubaustrageinrichtungen sind überwiegend mit freiem Auslauf konstruiert. Die getrockneten Körner werden in einem unterhalb des Austrags befindlichen Auslaufrichter gesammelt und zyklisch abtransportiert.

Sowohl für die Trocknerauslegung als auch zur Regelung des Trocknungsprozesses ist die Kenntnis des Schüttgutmassenstroms von entscheidender Bedeutung. Der Schüttgutmassenstrom ist die Hauptstellgröße in der Trocknerregelung. Das heißt, die Gutfeuchte am Trockneraustrag wird über die Verweilzeit geregelt, die ihrerseits umgekehrt proportional zu

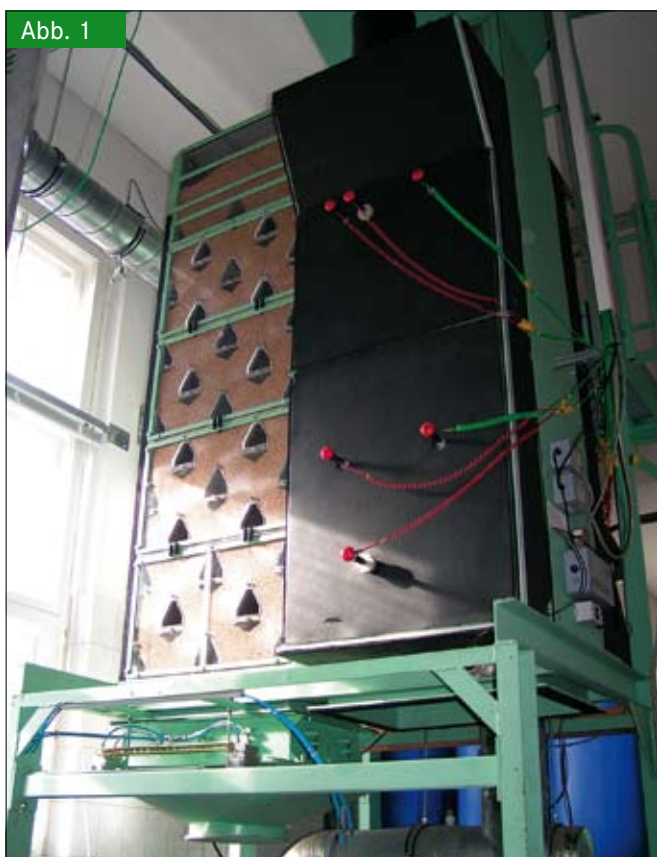


Foto des experimentellen Dächerschachttrockners (Foto: ATB)  
 Fig. 1: Photo of the experimental mixed-flow dryer (Photo: ATB)

dem Schüttgutmassenstrom ist. Aus der Literatur sind bisher keine Berechnungsansätze für den Schüttgutmassenstrom bekannt. Ziel dieser Arbeit war deshalb die Herleitung von Berechnungsgrundlagen für Dächerschachttrockner, die quasi-kontinuierlich im unterbrochenen Modus (interrupted flow) betrieben werden [5]. Basis dieser Untersuchungen bildete eine Analyse der Funktionsweise und der Durchflusscharakteristik des pneumatischen Schubbodenaustrags.

### Aufbau und Funktionsweise der Austrageinrichtung

Der für die experimentellen Untersuchungen verwendete Dächerschachttrockner am Leibniz-Institut für Agrartechnik

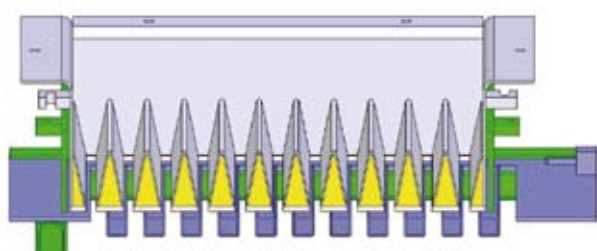
Potsdam-Bornim (ATB) besteht aus einem vertikalen Trocknungsschacht, in dem die Zuluft- und Abluftkanäle horizontal versetzt angeordnet sind (**Abbildung 1**). Der Trocknungsluftstrom wird mithilfe der Zuluft- und Abluftkanäle gelenkt. Das feuchte Gut wird von oben in den Trockner gefüllt und fließt aufgrund der Schwerkraft vertikal nach unten. Am Boden des Trockners befindet sich eine pneumatisch betriebene Schubaustrageinrichtung, mit der der Schüttgutmassenstrom gesteuert werden kann.

Industriell eingesetzte Dächerschachttrockner arbeiten in einer quasi-kontinuierlichen Betriebsweise. Dies bedeutet, dass die Schüttung während der Trocknung die meiste Zeit ruht und nur in einer kurzen Zeitspanne, in der der Austrag geöffnet ist, vertikal durch den Trocknerschacht fließt. Diese Betriebsweise wird gewählt, um eine entsprechende Verweilzeit des Getreides im Trockner zu gewährleisten. Für die experimentelle Untersuchung des Austragsverhaltens ist aber eine kontinuierliche Betriebsweise von Vorteil [5]. Im Dächerschachttrockner ist dies der Fall, wenn der Austrag dauerhaft geöffnet ist und die Partikel kontinuierlich ausfließen (continuous flow). Unter diesen Bedingungen lässt sich der kontinuierliche Austrag aus einem Dächerschachttrockner in Analogie zum Feststoffaustrag aus einem Silo beschreiben [6], bei dem die maximale Austragsrate erreicht wird.

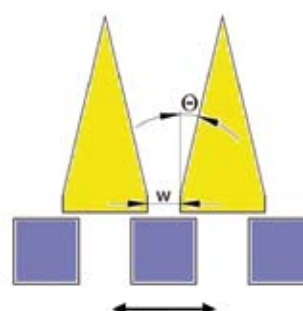
Für den diskontinuierlichen Schüttgutaustrag aus dem Versuchstrockner wurde eine pneumatisch betriebene Schubaustrageinrichtung entwickelt (**Abbildung 2**). Der obere, feststehende Teil der Austrageinrichtung besteht aus Dreieckprofilen (gelb), die mehrere Auslauftrichter über der Trocknerbreite formen. Der von den Pneumatikzylindern bewegte Schubboden besteht aus einzelnen Quadratprofilen (blau), die über einen Rahmen miteinander verschweißt sind. Die Schubaustrageinrichtungen großtechnischer Dächerschachttrockner sind prinzipiell ähnlich aufgebaut, jedoch ist deren Anzahl an Schlitzen geringer, die Schlitzweite größer und damit auch die Neigung der Trichterwände flacher. Für den Versuchstrockner wurde eine größere Anzahl der Auslauftrichter gewählt, um eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Schüttgutmassenstroms über dem kleinen Trocknerquerschnitt (0,6 x 0,4 m) zu erzielen. Durch die vergleichsweise steilen Trichterwände (kleine Winkel  $\Theta$ )

Abb. 2

a)



b)



(a) Schema, (b) Konstruktiver Ausschnitt der Austrageinrichtung  
 Fig. 2: (a) Schematic, (b) Construction element of the discharge device

wird der Schüttgutfluss verbessert. Die geringe Schlitzbreite  $w$  limitiert jedoch die maximal einsetzbare Korngröße.

In Dächerschachttrocknern wird der diskontinuierliche Austrag durch periodisches Öffnen und Schließen der Auslauftrichter mithilfe des beweglichen Schubodens realisiert. Der Schüttgutmassenstrom wird in der Praxis anhand des Zeitintervalls zwischen zwei Austrägen (Abspeisungen), der sogenannten Standzeit  $t_s$ , gesteuert. Die Standzeit setzt sich aus der Ruhezeit zwischen zwei Austragsvorgängen  $t_R$  und der Austragszeit  $t_A$  zusammen [5].

$$t_s = t_R + t_A \tag{Gl. 1}$$

Der Anteil  $t_R/t_s$  an der Gesamtverweilzeit entspricht dabei dem Zeitraum der effektiven Ruheschichttrocknung im Dächerschachttrockner.

**Durchflusscharakteristik und Schüttgutmassenstrom**

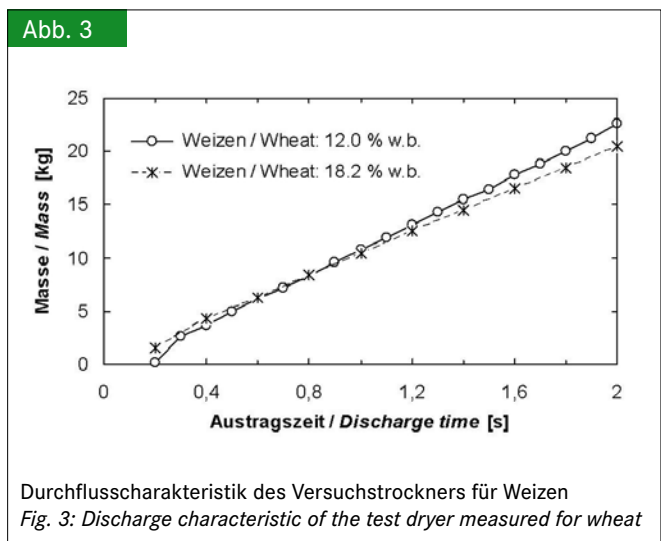
Die Durchflusscharakteristik von Schubaustrageinrichtungen mit freiem Auslauf wird maßgeblich durch die Austragszeit bestimmt. Die Austragszeit  $t_A$  entspricht dem Zeitintervall, in dem die Partikel durch die Austragsöffnungen fließen. Sie ist abhängig vom Aufbau und der Dynamik der Austrageinrichtung [5]. Die Durchfluss- bzw. Austragscharakteristik ist damit eine Funktion der Form

$$M_s = f(t_A) \tag{Gl. 2}$$

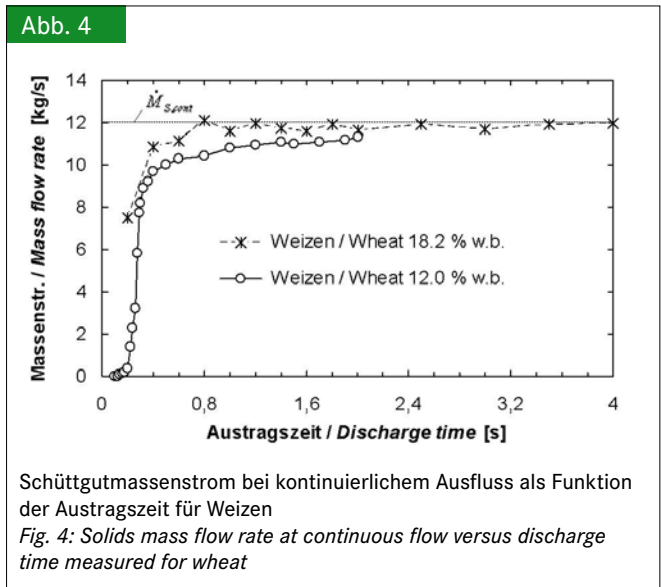
Aus mehreren Experimenten an Weizen wurde stets ein linearer Zusammenhang (**Abbildung 3**) ermittelt zu

$$M_s = a_1 \cdot t_A + a_2 \tag{Gl. 3}$$

Der Koeffizient  $a_1$  in Gleichung (3) hat die Dimension eines Massenstroms, der Koeffizient  $a_2$  die einer Masse. Am Beispiel von Weizen der Feuchte 12 % w.b. (w.b. = wet basis, bezogen auf feuchtes Gut) ergab die lineare Regression  $a_1 = 11,70$  kg/s



Durchflusscharakteristik des Versuchstrockners für Weizen  
Fig. 3: Discharge characteristic of the test dryer measured for wheat



Schüttgutmassenstrom bei kontinuierlichem Ausfluss als Funktion der Austragszeit für Weizen  
Fig. 4: Solids mass flow rate at continuous flow versus discharge time measured for wheat

und  $a_2 = -0,9693$  kg im Bereich der Austragszeit zwischen  $0,7 \text{ s} \leq t_A \leq 2,0 \text{ s}$  ( $R^2 = 0,9998$ ).

Neben den Versuchen zur Austragscharakteristik wurden Experimente zum kontinuierlichen Ausfluss aus dem Dächerschachttrockner (continuous flow) in Anlehnung an den Schüttgutaustrag aus Silos durchgeführt. Dazu wurde die Austragszeit  $t_A$  variiert und der Austragsmassenstrom  $\dot{M}_{S,kont} = \dot{M}_S / t_A$  gemessen. Die Ergebnisse für die zwei verwendeten Weizenchargen mit 12 bzw. 18,2 % w.b. sind in **Abbildung 4** dargestellt. Wie die Grafik zeigt, steigt dieser Schüttgutmassenstrom mit zunehmender Austragszeit kontinuierlich an und nähert sich asymptotisch einem Maximalwert. Dieser Maximalwert entspricht dem bei ungehindertem, kontinuierlichem Ausfluss erreichbaren maximalen Durchfluss  $\dot{M}_{S,kont}$ , der allein von konstruktiven Parametern und den Schüttguteigenschaften bestimmt wird. Für Weizen mit 12,0 % w.b. Feuchte wurde dieser Wert bestimmt zu  $\dot{M}_{S,kont} = 11,78$  kg/s, für Weizen mit 18,2 % w.b. zu  $\dot{M}_{S,kont} = 11,97$  kg/s. Ein Vergleich mit der Beziehung (3) verdeutlicht, dass der Anstieg  $a_1$  der Austragscharakteristik näherungsweise dem maximalen Durchfluss entspricht

$$a_1 \approx \dot{M}_{S,kont} \tag{Gl. 4}$$

Aus der Literatur sind verschiedene Ansätze zur Abschätzung des Auslaufmassenstroms aus Silos bekannt [6]. Das British Materials Handling Board [7] gibt für grobkörnige, frei fließende Schüttgüter in Massenflusstrichtern mit langgestreckten, rechteckigen Auslauföffnungen folgende Beziehung an

$$\dot{M} = 1,03 \cdot \rho_s \cdot \sqrt{g} \cdot (L - k \cdot d_p) \cdot (w - k \cdot d_p)^{1,5} \cdot (\tan \Theta)^{-0,35} \tag{Gl. 5}$$

Die Herleitung dieser Gleichung basiert auf der bekannten Ausflussformel von Torricelli für das reibungsfreie Ausfließen von Flüssigkeiten aus einem oben offenen Behälter mit einer

Bodenöffnung. Gleichung (5) gilt für  $L > 3 \cdot w$  sowie für Trichterneigungswinkel  $\Theta < 45^\circ$ . Der Formfaktor  $k$  wird für kugelförmige Partikel  $k = 1,6$  und für nicht kugelförmige Partikel  $k = 2,4$  gesetzt.

Im Unterschied zu einem Silo besitzt die Austrageinrichtung eines Dächerschachttrockners mehrere parallele Auslauftrichter  $N_{AS}$  (**Abbildung 2**). Deren Länge  $L$  entspricht etwa der Tiefe des Trocknerschachtes. Die Schlitzweite  $w$  variiert zwischen 0,05 und 0,1 m. In Gleichung (5) werden drei Schüttgutparameter berücksichtigt: der Formfaktor  $k$ , der mittlere Partikeldurchmesser  $d_p$  und die Schüttdichte  $\rho_s$ . Getreidekörner haben eine längliche Form, die der eines Ellipsoids sehr ähnlich ist. Beim Ausfließen aus Trichtern orientieren sie sich bekanntlich nach der Hauptströmung und richten ihre Längsachse überwiegend parallel zu den Trichterwänden aus [8]. Deshalb kann anstelle des mittleren Partikeldurchmessers  $d_p$  die Korndicke  $\delta$  eingesetzt werden.

Angewendet auf den Dächerschachttrockner mit Schubaustrageinrichtung und offenem Auslauf wird Gleichung (5) modifiziert zu

$$\dot{M}_{S,kont} = 1,03 \cdot \rho_s \cdot \sqrt{g} \cdot N_{AS} \cdot (L - k \cdot \delta) \cdot (w - k \cdot \delta)^{1,5} \cdot (\tan \Theta)^{-0,35} \quad (\text{Gl. 6})$$

Mithilfe von Gleichung (6) lässt sich der maximale Schüttgutmassenstrom für den kontinuierlichen Ausfluss aus einem Dächerschachttrockner (continuous flow) abschätzen. Diese Gleichung wurde anhand der Experimente zum kontinuierlichen Ausfluss getestet. Der Versuchstrockner verfügt über  $N_{AS} = 11$  Austragsschlitze mit einer Länge von  $L = 0,6$  m und einer Schlitzweite  $w = 0,01$  m. Der Neigungswinkel der Trichterwände beträgt  $\Theta = 13,4^\circ$  (**Abbildung 2 b**). Die Korndicke  $\delta$  wurde aus Messreihen von Regner [9] an Weizen der Sorte Avalon zu  $\delta = 2,7$  mm ermittelt. Für die Kornform wurde  $k = 1,6$  angenommen, da das geschnittene Korn in etwa Kreisform hat. Am Beispiel von Weizen der Feuchte 18,2 % w. b. mit einer Schüttdichte von  $\rho_s = 783$  kg/m<sup>3</sup> berechnet sich der maximale Schüttgutmassenstrom nach Gleichung (6) zu  $\dot{M}_{S,kont} = 11,69$  kg/s. Dieser Wert stimmt sehr gut mit den weiter oben genannten Messwerten überein.

In der Praxis werden Dächerschachttrockner diskontinuierlich im sogenannten unterbrochenen Modus (interrupted flow) betrieben. Bei bekannter Schüttgutmasse  $M_S$ , die pro Öffnungszyklus ausgetragen wird, berechnet sich dann der Schüttgutmassenstrom zu

$$\dot{M}_{S,int} = \frac{M_S}{t_S} \quad (\text{Gl. 7})$$

Gleichung (7) wird in der Industrie zur Steuerung des Massenstroms genutzt, indem die Standzeit  $t_S$  variiert wird. Dieser nichtlineare Zusammenhang ist für die Trocknerregelung allerdings nachteilig.

Ist die Durchflusscharakteristik bekannt, so ergibt sich nach Einsetzen von Gleichungen (3) und (4) in Beziehung (7) folgender Ansatz

$$\dot{M}_{S,int} = \dot{M}_{S,kont} \cdot \frac{t_A}{t_S} + \frac{a_2}{t_S} \quad (\text{Gl. 8})$$

Mit diesem Ansatz (Gl. 8) und unter Berücksichtigung von Gleichung (6) lässt sich der Schüttgutmassenstrom für den praktischen diskontinuierlichen Betrieb von Dächerschachttrocknern vorausberechnen. Der Term  $a_2/t_S$  aus der Durchflusscharakteristik berücksichtigt die Einflüsse der Öffnungs- und Schließvorgänge, die in jedem einzelnen Austrag wirken. Für überschlägige Berechnungen kann dieser vernachlässigt werden. Wie Gleichung (8) verdeutlicht, beträgt der Schüttgutmassenstrom im diskontinuierlichen Betrieb (interrupted flow) nur einen Bruchteil des maximalen Schüttgutmassenstroms bei kontinuierlichem Ausfluss (continuous flow). Deren Verhältnis  $\dot{M}_{S,int} / \dot{M}_{S,kont}$  entspricht damit dem Anteil der Austragszeit an der Standzeit  $t_A / t_S = t_A / (t_R + t_A)$ .

### Schlussfolgerungen

Auf der Grundlage von Experimenten zur Durchflusscharakteristik eines Dächerschachttrockners mit Schubaustrageinrichtung wurden Gleichungen zur Berechnung des Schüttgutmassenstroms für den kontinuierlichen und diskontinuierlichen Betrieb hergeleitet. Diese können bei der Trocknerauslegung und der Regelung des Trocknungsprozesses gleichermaßen Anwendung finden.

### Literatur

- [1] Mühlbauer, W. (2009): Handbuch der Getreidetrocknung. Clenze, AgriMedia Verlag
- [2] Maltry, W. (1966): Einige Untersuchungen zur Aufklärung des Verhaltens von Getreide im Dächer-Schachttrockner. Archiv für Landtechnik 5, S. 223-264
- [3] Klinger, J. (1977): Einige thermodynamische und strömungstechnische Untersuchungen zur Modellierung der Vorgänge in Dächerschachttrocknern für Getreidekörner. Dissertation. Technische Universität Dresden
- [4] Cenkowski, S.; Miketnac, M.; Kelm, A. (1990): Airflow patterns in a mixed-flow dryer. J. Can. Agric. Eng. 32, pp. 85-90
- [5] Mellmann, J.; Teodorov, T. (2011): Solids transport in mixed-flow dryers. Powder Technology 205, pp. 117-125
- [6] Schulze, D. (2009): Pulver und Schüttgüter. Berlin, Springer Verlag, 2. Aufl.
- [7] British Standards Institution (Ed.) (1987): Draft design code for silos, bins, bunkers and hoppers. Published by BSI in association with the British Materials Handling Board
- [8] Markauskas, D.; Kačianauska, R. (2011): Investigation of rice grain flow by multi-sphere particle model with rolling resistance. Granular Matter 13, pp. 143-148
- [9] Regner, S. (1995): Kernel mass related properties of cereal grains. Ph.D. dissertation. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala

### Autoren

**Dipl.-Ing. Teodor Teodorov** und **Dipl.-Ing. (FH) Holger Scaar** sind Versuchingenieure, **Dipl.-Ing. Fabian Weigler** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und **Dr.-Ing. Jochen Mellmann** Leiter der Arbeitsgruppe Trocknung am Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB), Abteilung Technik der Aufbereitung, Lagerung und Konservierung, Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam. E-Mail: jmellmann@atb-potsdam.de