

Fabian Weigler, Georg Franke, Holger Scaar und Jochen Mellmann

Experimente zum Partikelfluss an einer neu entwickelten Geometrie für Dächerschachttrockner

Um große Mengen an Körnerfrüchten über einen längeren Zeitraum lagerfähig zu machen, werden weltweit zunehmend Dächerschachttrockner (DST) eingesetzt. Trocknereinbauten, die ungünstig konstruiert oder angeordnet sind, können eine breite Verweilzeitverteilung des zu trocknenden Gutes verursachen. Dadurch kommt es lokal zu unterschiedlichen Trocknungsbedingungen, die zu einer inhomogenen Trocknung und damit zu einem erhöhten spezifischen Energieverbrauch, zu wirtschaftlichen Verlusten und zu Qualitätseinbußen führen. Mit dem Ziel der Sicherung der Produktqualität und der Steigerung der Energieeffizienz wurde daher eine neuartige Apparategeometrie entwickelt. Um das traditionelle Design mit der neu entwickelten Geometrie hinsichtlich der Partikeldurchströmung vergleichen zu können, wurden Durchflussversuche am Modellgut Weizen mit eingefärbten Körnern als Tracerpartikel im Technikumsmaßstab durchgeführt.

eingereicht 4. November 2013

akzeptiert 16. Januar 2014

Schlüsselwörter

Dächerschachttrockner, Feststofftransport, Tracerpartikel, Trocknerentwicklung

Keywords

Mixed-flow grain dryer, solids transport, tracer particles, dryer development

Abstract

Weigler, Fabian; Franke, Georg; Scaar, Holger and Mellmann, Jochen

Experiments on particle flow in a newly developed mixed-flow dryer geometry

Landtechnik 69(1), 2014, pp. 30-34, 5 figures, 13 references

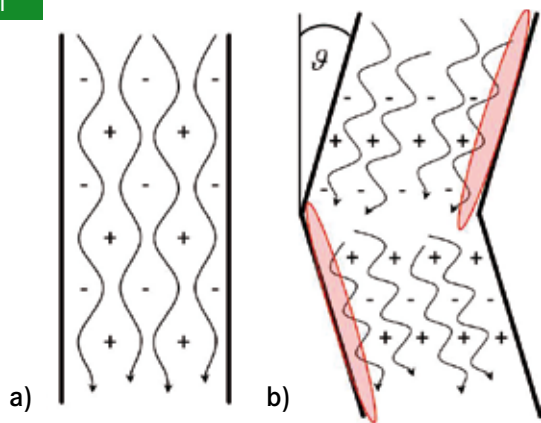
To preserve large mass flows of grain for long term storage, mixed-flow dryers (MFD) are increasingly used worldwide. Design elements which are unfavorably constructed or arranged can cause broad residence time distributions. Hence,

locally different drying conditions occur followed by inhomogeneous drying. As a result, the specific energy consumption increases accompanied by economic and quality losses. With the objective of saving product quality and increasing energy efficiency a new dryer geometry was developed. To compare and evaluate the new design with the traditional geometry regarding solids transport, a series of semi-technical particle flow experiments were performed using wheat as bed material and colored tracer particles.

■ Ein Dächerschachttrockner besteht aus einem vertikalen Trocknungsschacht, in den das vorgereinigte, rieselfähige Getreide von oben aufgegeben wird. Dachförmige Einbauten zur Verteilung der Trocknungsluft sind homogen über die gesamte Höhe angeordnet. Das feuchte Gut fließt aufgrund der Schwerkraft vertikal nach unten. Am Boden des Trockners befindet sich eine Austragsvorrichtung, mit der die Produktverweilzeit im Trockner eingestellt wird. Die Gleichmäßigkeit der Trocknung wird maßgeblich durch Form, Dimension, Anzahl und Anordnung der Luftkanäle für die Zu- bzw. Abluft bestimmt. Neben der Luftführung nehmen diese Einbauten entscheidenden Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Schüttgutes.

Obwohl der Dächerschachttrockner (DST) Stand der Technik ist, blieb die Apparategestaltung in den vergangenen Jahrzehnten nahezu unverändert und wurde bislang keiner systematischen verfahrenstechnischen Analyse unterzogen.

Abb. 1



Schematische Darstellung des Partikelflusses in einem Dächerschachttrockner: a) traditionelle Geometrie, b) neu entwickelte Geometrie. Die Symbole (+) und (-) bezeichnen Zuluft- bzw. Abluftkanäle.

Fig. 1: Schematic of the particle flow in a mixed-flow dryer: a) traditional design, b) new developed geometry. The symbols (+) and (-) denote inlet and outlet air ducts, respectively.

Erste Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Luftkanalgeometrien auf den Partikelfluss wurden bereits von Maltry [1] und Klinger [2] mithilfe von farbigen Getreidekörnern durchgeführt. Chaabouni et al. [3] untersuchten die Schüttgutbewegung in DST auf Grundlage einer Verweilzeitanalyse mit farbigen Tracerpartikeln. Dadurch konnte erstmals experimentell nachgewiesen werden, dass Partikel in der Mitte des Trockners schneller fließen als in Wandnähe.

Die Mehrzahl bisheriger Forschungsarbeiten über Dächerschachttrockner war der Steigerung der Trocknerleistung und der Sicherung der Produktqualität durch verbesserte Prozesssteuerungen [4–6] gewidmet. Mithilfe analytischer und numerischer Modelle wurde versucht, den Trocknungsprozess in Dächerschachttrocknern zu beschreiben [7, 8]. Um die Schüttgutbewegung und damit die Verteilungen der Partikelgeschwindigkeit und der Verweilzeit in einem DST genauer untersuchen zu können, entwickelten Iroba et al. [9] und Weigler et al. [10] zweidimensionale Modelle auf Basis der Diskretelemente-Methode (DEM). Mithilfe der diskreten Berechnungen wurden Partikeltrajektorien im Dächerschachttrockner ermittelt. Diese Untersuchungen bestätigten das experimentell ermittelte Ergebnis, dass Partikel in der Mitte des Trockners schneller fließen als wandnahe Partikel. Dieser als Kernfluss bekannte Effekt führt zu einem inhomogenen Partikelstrom. Die Folge davon ist eine ungleichmäßige Trocknung, die durch erhebliche Schwankungen der Partikelfeuchteverteilung über dem Querschnitt am Austrag des Trockners gekennzeichnet ist [11]. Partikel mit hohen Geschwindigkeiten und einer geringen Verweilzeit werden untertrocknet, während Partikel mit einer geringeren Geschwindigkeit und somit einer hohen Verweilzeit übertrocknet werden. Daher ist es notwendig, die Apparategeometrie des Dächerschachttrockners zu optimieren und den Trocknungsprozess zu verbessern. Auf diese Weise können Trocknungskosten und Qualitätsverluste durch Übertrocknen

reduziert und die Bildung von Schimmel und Toxinen bei der Lagerung infolge Untertrocknung vermieden werden.

Neu entwickelte Geometrie

In der Arbeitsgruppe Trocknung des Leibniz-Instituts für Agartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB) wurde eine neue Apparategeometrie für den DST [12] entwickelt (**Abbildung 1, b** und **Abbildung 2, b**). Die neue Geometrie besteht aus einem vertikal angeordneten Trocknerschacht mit geneigten Wänden und variabel austauschbaren Luftkanälen. Die Seitenwände einer Trocknersektion sind um einen bestimmten Winkel ϑ zur Vertikalen geneigt. Dieser Winkel entspricht dem Neigungswinkel der Diagonalen, die durch die Mittelpunkte der Dächer verlaufen. Je Trocknersektion erfolgt ein Wechsel des Neigungswinkels der Seitenwände. Dadurch ändert sich die Bewegungsrichtung der Partikel von Sektion zu Sektion. Die Partikelbahnen verlaufen parallel zu den diagonalen Dachreihen, wodurch es zu einer abwechselnden Umströmung von heißen Zuluft- bzw. kalten Abluftkanälen kommt. Dies führt zu einer Vergleichmäßigung der Trocknung. Der Komplementärwinkel zu ϑ ist größer als der Schüttwinkel der meisten Schüttgüter, sodass Brückenbildung an den Seitenwänden vermieden wird. Die neue Apparategestaltung beinhaltet außerdem eine mehrstufige Produktstrom-Quervermischung. Diese wird durch seitlichen Versatz der Dachreihen an den Schnittstellen der Sektionen erreicht (**Abbildung 2, b**). Der Vorteil dieser mehrstufigen Produktmischung liegt in einer verbesserten Ausnutzung des Trocknungspotenzials der Luft. Gutfeuchtesträhnen werden aufgelöst, die Trocknungsbedingungen vergleichmäßig und die Trocknungseffizienz gesteigert.

Da die Wandreibung aufgrund der Neigung der Seitenwände steigt, können durch diese Anordnung nahe der Trocknerwand gezielt Bereiche mit niedriger Partikelgeschwindigkeit erzeugt werden. Wenn zusätzlich Luftkanäle entnommen werden, entstehen in Wandnähe Bereiche mit niedriger Luftgeschwindigkeit. In **Abbildung 1, b** sind die Bereiche mit niedriger Partikel- und Luftgeschwindigkeit rot markiert. Die Anpassung von Partikel- und Luftgeschwindigkeiten in den wandnahen Bereichen und in der Trocknermitte führt zu einer gleichmäßigeren Trocknung, d. h. zu einer homogenen Partikelfeuchteverteilung über dem Trocknerquerschnitt.

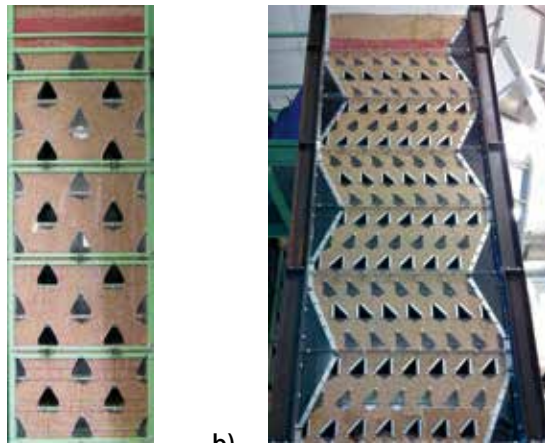
Experimentelle Untersuchungen

Die Untersuchungen zur Entwicklung der neuen Apparategeometrie unterteilen sich in drei Bereiche:

- Partikelfluss
- Luftströmungsverteilung
- Trocknung

In den ersten beiden Versuchsreihen werden zunächst die Teilprozesse Partikelbewegung und Luftströmung untersucht. Anhand erster Versuchsergebnisse konnten bereits Verbesserungen an der Geometrie vorgenommen werden. Der dritte Bereich beinhaltet den „realen“ Prozess der Trocknung, in dem sämtliche Teilprozesse miteinander gekoppelt sind. Erst anhand pra-

Abb. 2



Technikumstrockner mit a) herkömmlicher Apparategeometrie und b) neuer Apparategeometrie (Foto: ATB)

Fig. 2: Test dryer with a) traditional design and b) new design

xisnaher Trocknungsversuche kann die Wirkung einzelner Designelemente überprüft und tatsächlich bewertet werden. Als Versuchsgut wird Weizen als Hauptgetreideart in Deutschland ausgewählt. Die Partikelgröße von Weizen ist – im Vergleich zu Mais – außerdem klein genug, um im verkleinerten Maßstab des Technikumstrockners Fließfähigkeit zu gewährleisten. Die Weiterentwicklung der neuen Apparategeometrie bis hin zur Markteinführung ist in einem Folgeprojekt vorgesehen. Die Ergebnisse sollen durch Scale-up im Maßstab 1:5 auf einen großtechnischen Demonstrator übertragen werden. Die Industrieanlage soll zum Trocknen verschiedenster Produkte wie Weizen, Roggen, Gerste, Mais, Sonnenblumen und anderen rieselfähigen Körnerfrüchten genutzt werden. Dabei unterscheiden sich die Produkte deutlich in Bezug auf die Form und die Größe voneinander.

Die Versuche zum Partikeldurchfluss an der herkömmlichen und der neu entwickelten Geometrie wurden im Technikumsmaßstab durchgeführt (**Abbildung 2**). Beide Trockner haben einen lichten Querschnitt von 0,6 x 0,4 m (ohne Einbauten). Zur Visualisierung der Partikelbewegung wurden die Versuchstrockner mit einer Wand aus Acrylglas ausgestattet.

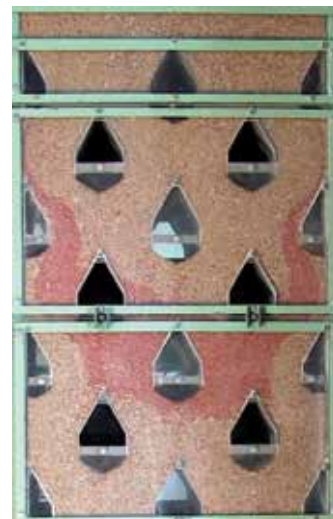
Der Trockner mit herkömmlicher Geometrie (**Abbildung 2, a**) besteht aus einem vertikalen Schacht mit einer Höhe von etwa 2 m, einer Breite von 0,6 m und einer Tiefe von 0,4 m. Dachförmige Kanäle für Zu- und Abluft sind im Trocknerschacht gleichmäßig angeordnet. Die Kanäle haben eine Breite von 0,1 m und eine Höhe von 0,13 m. Der Dachwinkel beträgt 30° (Neigungswinkel zur Vertikalen). Der horizontale Dachabstand beträgt 0,2 m. Die Reihen sind jeweils um einen halben Dachabstand versetzt. Die Luftkanäle sind auf der Unterseite offen, sodass die Zuluft in die Schüttung einströmen bzw. die Abluft ausströmen kann.

Der Trockner mit neuer Geometrie (**Abbildung 2, b**) besteht aus einem vertikal angeordneten Trocknerschacht mit geneigten Wänden und ist in sechs Sektionen eingeteilt, wobei die Rich-

tung der Neigung von Sektion zu Sektion wechselt. Der Trocknerschacht hat eine Höhe von etwa 2 m, eine Breite von 0,6 m und einer Tiefe von 0,4 m. Die trapezförmigen Luftkanäle mit einer Breite von 0,05 m und eine Höhe von 0,055 m sind in horizontalen Reihen über dem Trockner angeordnet. Der Dachwinkel beträgt 45°. Eine Trocknersektion besteht aus 3 Luftkanal-Reihen. Jede Reihe umfasst 6 vollständige und einen halben Luftkanal. Der horizontale Dachabstand beträgt 0,04 m. Die Sektionen sind jeweils baugleich und abwechselnd um die Vertikalachse gespiegelt.

Die Versuchstrockner im Technikumsmaßstab sind mit einer pneumatisch betätigten Austragsvorrichtung versehen, die auf dem Prinzip der Zelleradschleuse basiert und eine konstante volumetrische Förderung sicherstellt. Mit diesem Austragsystem wird ein gleichmäßiger Massenstrom über dem Austragsquerschnitt gewährleistet. Um den Einfluss der Austragsvorrichtung beurteilen zu können, wurden in einer weiteren Versuchsreihe Durchlaufversuche ohne Austrag vorgenommen. Die Ergebnisse zeigten ein ähnliches Fließprofil, das aufgrund der höheren Partikelgeschwindigkeit jedoch stärker ausgeprägt war als bei den Versuchen mit Austragsystem. Auf diese Ergebnisse wird in dieser Arbeit aber nicht weiter eingegangen. Zur Visualisierung der Partikelbewegung wurde eine 150 mm hohe Schicht aus eingefärbten Weizenkörnern in die Schüttung eingebracht (**Abbildung 2**). Die Reproduzierbarkeit der Versuche wurde durch mehrmaliges Wiederholen der Experimente bestätigt. Diese Reproduzierbarkeit konnte nur mit gleich bleibender Qualität des Weizens realisiert werden. Deshalb wurden die Versuche zur Partikelbewegung an Lagerweizen mit einer Gutfeuchte von 15 % w. b. und einer Schüttdichte von $\rho_s = 780 \text{ kg/m}^3$ durchgeführt. Ein weiterer Grund für die Auswahl von Lagerweizen ist die geringe Lagerkapazität für frisch geerntete Körnerfrüchte an unserem Institut.

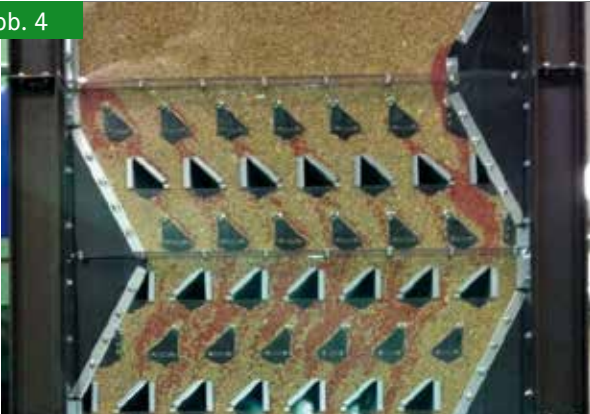
Abb. 3



Partikelströmungsprofil gefärbter Weizenkörner in der herkömmlichen Apparategeometrie (Foto: ATB)

Fig. 3: Particle flow profile of the colored wheat particles in the test dryer with traditional design

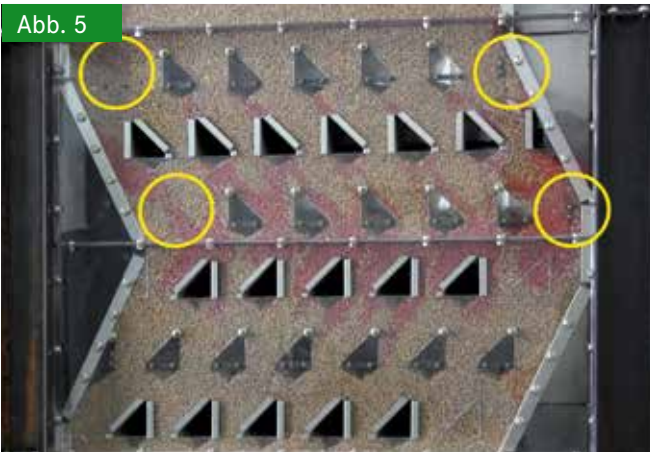
Abb. 4



Partikelströmungsprofil der eingefärbten Weizenkörner in der neu entwickelten Apparategeometrie mit maximaler Luftkanal-Anzahl (Foto: ATB)

Fig. 4: Particle flow profile of colored wheat particles in the test dryer with new design and maximum number of air ducts

Abb. 5



Partikelströmungsprofil in der neu entwickelten Apparategeometrie mit optimierter Anzahl der Luftkanäle (Foto: ATB)

Fig. 5: Particle flow profile in the new designed dryer geometry with optimized number of air ducts

Ergebnisse

Die Versuche dienen dem qualitativen Vergleich der ermittelten Partikelströmungsprofile der eingefärbten Partikel. **Abbildung 3** zeigt das Partikelströmungsprofil einer Weizenschüttung in der herkömmlichen Apparategeometrie nach 4 Sekunden kontinuierlichen Fließens (Austrag offen) [13]. Es ist deutlich zu erkennen, dass die gefärbte Kornschicht aufgrund des Wandeinflusses ein ausgeprägtes Strömungsprofil aufweist. Der Partikelstrom durch die Mitte des Trockners hat eine höhere Vertikalgeschwindigkeit als der Partikelstrom in Wandnähe. Die langen Strähnen an den Wänden weisen auf den Einfluss der Apparatewand und der halben Luftkanäle. Durch Beobachtung des Farbverlaufs in den Luftkanälen wurde über der Tiefe des Trockners ein ähnliches Strömungsprofil ermittelt, das durch die Verzögerung der Partikelbewegung an der Vorder- und Rückwand hervorgerufen wurde. Der Einfluss der Wand verstärkt sich besonders in den Ecken des Apparate-

querschnitts. Das beobachtete Fließverhalten erinnert an den Kernfluss in einem Silo.

Die ersten Experimente an der neuen Apparategeometrie wurden mit der maximal möglichen Anzahl an Luftkanälen (sechs vollständige Luftkanäle und ein halber pro Reihe) durchgeführt. **Abbildung 4** zeigt das Partikelströmungsprofil der farbigen Kornschicht in der neu entwickelten Apparategeometrie nach 4 Sekunden kontinuierlichen Fließens. In der Mitte des Trockners ist ein homogener Partikelstrom zu erkennen. Gleichzeitig kommt es an den Seitenwänden zu einem erheblichen Rückstau der Partikel, der auf den geringen Abstand zwischen den wandnahen Dächern und der geneigten Trocknerwand zurückzuführen ist.

Um den starken Rückstau des Partikelstroms an den Seitenwänden zu verringern, wurden nach mehreren Zwischenversuchen zwei volle Luftkanäle in Wandnähe und zwei gegenüberliegende halbe Luftkanäle pro Sektion entfernt (**Abbildung 5**). Die Positionen der entnommenen Luftkanäle sind in der Abbildung gelb gekennzeichnet. Dadurch wurde der Partikelfluss in Wandnähe deutlich beschleunigt. Das Foto zeigt die farbige Kornschicht nach 4 Sekunden kontinuierlichen Austrags. In der Mitte des Trockners ist ein homogener Partikelstrom zu erkennen, der in den wandnahen Bereichen geringfügig verzögert wird. Die Profilbildung über der Tiefe des Trockners konnte nicht verhindert, aber zumindest verringert werden. Durch die Änderung des Wandneigungswinkels nach jeder Sektion und die damit verbundene Änderung der Partikelfließrichtung kommt es zu einer erhöhten Rückvermischung im Trockner. Dadurch wird zwar die mittlere Verweilzeit erhöht, die Trocknung wird jedoch gleichmäßiger. Zusätzlich werden durch die Entnahme der Luftkanäle Bereiche mit geringerer Luftdurchströmung geschaffen, in denen Getreidepartien mit geringer Partikelgeschwindigkeit fließen. Durch diesen Effekt kann die Trocknungsgeschwindigkeit beeinflusst werden, um Über Trocknung im wandnahen Bereich zu vermeiden.

Schlussfolgerungen

Mit der neu entwickelten Geometrie ist es möglich, sowohl Partikel- als auch Luftgeschwindigkeiten lokal aufeinander abzustimmen und somit der Über Trocknung an den Wänden entgegenzuwirken. Die mehrstufige Produktmischung führt zu einer Steigerung der Trocknungseffizienz. Mit einer gleichmäßigeren Trocknung kann Energie eingespart und ferner die Produktqualität verbessert werden. Die positiven Effekte der neuen Trocknergeometrie auf Energiebedarf und Qualität konnten in dieser Versuchsreihe noch nicht verifiziert werden. Dieser Nachweis kann erst anhand von Trocknungsversuchen an der neuen Apparategeometrie geführt werden, die in einem Folgeprojekt durchgeführt werden sollen.

Literatur

- [1] Maltry, W. (1966): Einige Untersuchungen zur Aufklärung des Verhaltens von Getreide im Dächer-Schachttrockner. Archiv für Landtechnik 5(3), S. 223-264

- [2] Klinger, J. (1977): Einige thermodynamische und strömungstechnische Untersuchungen zur Modellierung der Vorgänge in Dächerschachttrocknern für Getreidekörner; Ph.D. Dissertation, TU Dresden
- [3] Chaabouni, M.; Flick, D.; Techasena, O. (1992): Particles flow in industrial grain driers. In: Proceedings of the 8th International drying Symposium (IDS'92), A. S. Mujumdar (Ed.), Drying '92, Montreal, Canada, August 2-5, 1992, Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., pp. 1409-1418
- [4] McFarlane, N.J.B.; Bruce, D.M. (1991): Control of mixed-flow grain driers: Development of a Feedback-plus-Feedforward Algorithm. *Journal of Agricultural Engineering Research* 49, pp. 243-258
- [5] Courtois, F.; Nouafo, J.L.; Trystram, G. (1995). Control strategies for corn mixed-flow dryers. *Drying Technology* 13, pp. 147-164
- [6] Liu, X.; Chen, X.; Wu, W.; Zhang, Y. (2006): Process control based on principal component analysis for maize drying. *Food Control* 17, pp. 894-899
- [7] Cao, C.W.; Yang, D.Y.; Liu, Q. (2007): Research on Modeling and Simulation of Mixed-Flow Grain Dryer. *Drying Technology* 25, pp. 681-687
- [8] Giner, S.A.; Bruce, D.M. (1998): Two-dimensional simulation model of steady-state mixed-flow grain drying. Part 1: The model. *Journal of Agricultural Engineering Research* 71, pp. 37-50
- [9] Iroba, K.L.; Mellmann, J.; Weigler, F.; Metzger, T.; & Tsotsas, E. (2011): Particle velocity profiles and residence time distribution in mixed-flow grain dryers. *Granular Matter* 13, pp. 159-168
- [10] Weigler, F.; Scaar, H.; Mellmann, J. (2012): Investigation of particle and air flows in a mixed flow dryer. *Drying Technology* 30 (15), pp. 1730-1741
- [11] Mellmann, J.; Iroba, K.L.; Metzger, T.; Tsotsas, E.; Mészáros, C.; Farkas, I. (2011): Moisture Content and Residence Time Distributions in Mixed-Flow Grain Dryers. *Biosystems Engineering* 109, pp. 297-307
- [12] Mellmann, J.; Weigler, F.; Scaar, H.; Teodorov, T. (2011): Dächerschachttrockner zur Trocknung von Schüttgut (Mixed-flow dryer for drying of bulk solids). European patent, EP 11180103
- [13] Mellmann, J.; Teodorov, T. (2011): Solids transport in mixed-flow dryers. *Powder Technology* 205(1-3), pp. 117-125

Autoren

Dr.-Ing. Fabian Weigler ist wissenschaftlicher Mitarbeiter, **Dipl.-Ing. (FH) Holger Scaar** und **Dipl.-Ing. (FH) Georg Franke** sind Versuchsingenieure und **Dr.-Ing. Jochen Mellmann** ist 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: fweigler@atb-potsdam.de

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF/PTKA) für die Förderung des KMU-innovativ Verbundprojekts GETRO (FKZ: 02PK2158).