

Verfahrenstechnische Optimierung von Schachttrocknern zur Trocknung landwirtschaftlicher Ernteerzeugnisse

Fabian Weigler, Holger Scaar, Georg Franke, Harald Kuhlmann, Arno Grothaus, Jochen Mellmann

Dächerschachttrockner kommen meist dann zum Einsatz, wenn große Mengen an Getreide, Mais und Sojabohnen haltbar gemacht werden müssen. Obwohl der Prozess der konvektiven Trocknung bereits umfangreich untersucht wurde und Stand der Technik bei der thermischen Getreidekonservierung ist, bestehen noch immer Wissenslücken in der Beschreibung des Gesamtprozesses und vor allem ein großes Optimierungspotenzial in der konstruktiven Gestaltung der zur Trocknung verwendeten Apparate. Durch verfahrenstechnische Analyse und Entwicklung des Trocknungsapparates können erhebliche Fortschritte in der Prozess- und Produktqualität bei der Getreidetrocknung erzielt werden. Dazu ist es notwendig, das Wissen über den Dächerschachttrockner durch Untersuchung der Teilprozesse der Partikelbewegung, Luftströmung sowie der Wärme- und Stoffübertragung zu erweitern. Basierend auf experimentellen und numerischen Untersuchungen dieser Prozesse mittels diskreter Partikelmodellierung und numerischer Strömungssimulation wurden verschiedene, innovative Trocknerkonfigurationen entwickelt. Diese führen zu einer Homogenisierung der Trocknungsbedingungen, zu einer besseren Ausnutzung des Trocknungspotenzials der Luft und damit zu höheren Trocknungseffizienz.

Schlüsselwörter

Getreidetrocknung, Dächerschachttrockner, DEM, CFD, Trocknerentwicklung

Das Trocknen von Getreide nach der Ernte ist für eine bessere Lagerung, Handhabung und Weiterverarbeitung (BROOKER et al. 1992, DAS und CHAKRAVERTY 2003) unbedingt notwendig. Die Art des Trocknungsprozesses hängt von der Produktmenge, dem Erntefeuchtegehalt und von der für die jeweilige Anwendung notwendigen Produktqualität ab. Die Anforderungen an die Produktqualität sind ausschlaggebend für die Trocknungsparameter, wie beispielsweise die Korntemperatur, und legen damit oft die Wahl des geeigneten Trocknungssystems fest.

Durchlauf Trockner sind weltweit die vorwiegend verwendete Art von Getreidetrocknern. Eine spezielle Ausführung davon – der Dächerschachttrockner (DST) – wird zunehmend bei einem hohen Produktdurchsatz mit hohem Feuchtegehalt verwendet. Die erwärmte Trocknungsluft wird der vertikal fließenden Kornschüttung über ein System von horizontal angeordneten dachförmigen Luftkanälen zugeführt. Aufgrund dieser Anordnung durchlaufen vertikale Partikelströme nacheinander Gleichstrom-, Gegenstrom- und Querstrombereiche im gesamten Trocknerschacht. Bereits geringfügige Änderungen in der Gestaltung und Anordnung der Luftkanäle beeinflussen die Homogenität der Trocknung und damit die Prozessqualität erheblich. Ungünstige Trocknerkonstruktionen können somit eine breite Verweilzeitverteilung und eine ungleichmäßige Trocknung verursachen, was zu

einer Über- oder Untertrocknung des Getreides führen kann. Als Folge können Qualitätsverluste und ein erhöhter Energieverbrauch auftreten. Wie von LIU (1993) gezeigt wurde, gibt es signifikante Unterschiede in der Verweilzeit einzelner Körner und deren Temperaturverlauf. Diese führen zu einer größeren Streuung der Kornfeuchte und der Korntemperatur am Trocknerausgang.

Der Trocknungsprozess in Dächerschachttrocknern ist äußerst komplex, da sich das Getreide und die Trocknungsluft gleichzeitig parallel, gegenläufig und quer durch den Trocknerschacht bewegen (PABIS et al. 1998). Dies ist vermutlich eine Ursache dafür, dass nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen über die Teilprozesse der Luftströmung, Partikelbewegung und Wärme- und Stoffübertragung vorliegen (CENKOWSKI et al. 1990, GINER et al. 1998). Bislang wurden keine vergleichbaren Studien veröffentlicht, die sich mit Konstruktionsänderungen des Trockners und deren Auswirkungen auf Brennstoffverbrauch, Kornqualität und Trocknerkapazität beschäftigen. Gleichwohl gibt es immer wieder einzelne theoretische Abhandlungen und auch anwendungsorientierte praktische Versuchsreihen von Herstellern, die durch gezielte Verfahrensoptimierungen (Temperaturzonen, Kaskadenanordnung und geometrische Veränderungen) zu einer Erhöhung der Trocknereffizienz geführt haben (MÜHLBAUER 2009, OLESEN 1987).

Der Großteil der bisherigen Arbeiten konzentrierte sich auf die Entwicklung und Optimierung der Trocknersteuerungen (COURTOIS et al. 1995, LIU et al. 2003), aber auch der Apparategeometrie. In den letzten Jahren erhöhte sich die Anzahl der wissenschaftlichen Arbeiten zum DST (CAO et al. 2007, MELLMANN et al. 2007, KOCSIS et al. 2008, IROBA et al. 2011a, IROBA et al. 2011b, MELLMANN et al. 2011, WEIGLER et al. 2012, KEPPLER et al. 2012, OKSANEN 2018). Aufgrund der komplexen Strömungsmuster und Gas-Feststoff-Wechselwirkungen sind numerische Methoden erforderlich, um Einzelprozesse und den gesamten Trocknungsprozess im DST zu modellieren. MELLMANN et al. (2011, 2016) haben erstmals den Einfluss unterschiedlicher Luftkanalanordnungen auf die Kornfeuchte- und Korntemperaturverteilungen am Trocknerausgang sowie den Zusammenhang zwischen den variierenden Partikelfeuchte-, Luftströmungs- und Verweilzeitverteilungen untersucht. Hierzu wurden die Schüttbettbewegung und die Trocknungsluftströmung experimentell untersucht und numerisch mit der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) und mit Computational Fluid Dynamics (CFD) modelliert (KOCSIS et al. 2008, IROBA et al. 2011a, IROBA et al. 2011b, MELLMANN et al. 2011, WEIGLER et al. 2012, SCAAR et al. 2016). Die Partikelfeuchte- und Partikeltemperaturverteilungen wurden in halbtechnischen Trocknungsexperimenten analysiert. Der Einfluss bestimmter Gestaltungselemente auf die Verweilzeitverteilung und die Existenz unterschiedlicher Partikelflussregionen wurden belegt (IROBA et al. 2011a). Der unmittelbare Zusammenhang zwischen Partikel- und Luftströmungsprofil einerseits und der Kornfeuchteverteilung nach der Trocknung über dem Apparatequerschnitt andererseits konnte nachgewiesen werden (MELLMANN et al. 2011, MELLMANN et al. 2016).

Durch verfahrenstechnische Optimierung der Trocknergeometrie kann die Trocknungsleistung im Vergleich zum herkömmlichen Trockner deutlich gesteigert werden. Um die Produkt- und Prozessqualität zu erhöhen, ist es notwendig, das Wissen über dieses Trocknerkonzept zu erweitern und die Einzelprozesse von Partikelfluss, Luftströmung und Wärme- und Stofftransport zu untersuchen. Ziel ist es, durch Neuentwicklungen der Apparategeometrie sowie der geometrischen Anpassung von Einbauten einen leistungsstarken Trockner zu entwickeln.

Untersuchungen zum Ist-Zustand

In Dächerschachttrocknern trocknet Getreide nicht homogen, d.h. es existieren aufgrund von inhomogener Partikel- (Kernfluss) und Prozessluftströmung (Totzonen) signifikante Feuchtigkeits- und Temperaturgradienten über den gesamten Trocknerquerschnitt. Selbst wenn der Grad der Inhomogenität während des Nachkühlprozesses abnimmt und, unabhängig davon, der durchschnittliche Feuchtigkeitsgehalt das gewünschte Niveau der Lagerfeuchte erreicht, gibt es dennoch eine erhebliche Varianz der Feuchteverteilung unter den Körnern, die den Trockner verlassen. Diese Varianz der Partikelfeuchtegehalte kann bis zu 5 Gew.-% über den gesamten Querschnitt betragen (MELLMANN et al. 2011).

Um die inhomogene Produktfeuchteverteilung während des Trocknungsprozesses zu identifizieren, wurde eine DST-Geometrie im halbtechnischen Maßstab experimentell und numerisch analysiert. Der Trockner besteht aus einem vertikalen Schacht mit einer Höhe von etwa 2 m und einer Breite von 0,6 m (Abbildung 1). Dachförmige Kanäle für Zu- und Abluft werden im Trocknerschacht gleichmäßig angeordnet. Horizontale Reihen mit halben Luftkanälen an den Seitenwänden wechseln sich mit Reihen ohne halbe Luftkanäle ab. Der Trockner hat eine Querschnittsfläche von 600 x 400 mm in der Horizontalen. Um die Partikelbewegung zu untersuchen, wurde der Trockner mit einer Wand aus Acrylglas ausgestattet. Für eine Beobachtung der Partikelbewegung können die Zu- bzw. Ablufthaube einfach abmontiert werden.

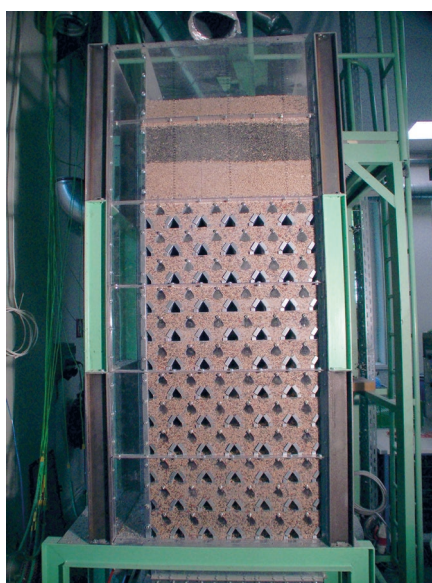


Abbildung 1: Geometrie des Versuchstrockners ohne Zu- und Ablufthaube zur verfahrenstechnischen Analyse des Partikelflusses, der Luftströmung und des Trocknungsprozesses (© F. Weigler)

Schüttgutbewegung

Abbildung 2 zeigt experimentelle und numerische Fließprofile der Schüttgutbewegung, die im Versuchstrockner aufgezeichnet wurden. Zwei Fließzonen sind sichtbar: eine relativ breite Kernströmungszone in der Mitte und die wandnahen Fließzonen mit einer ausgeprägten Geschwindigkeitsverteilung.

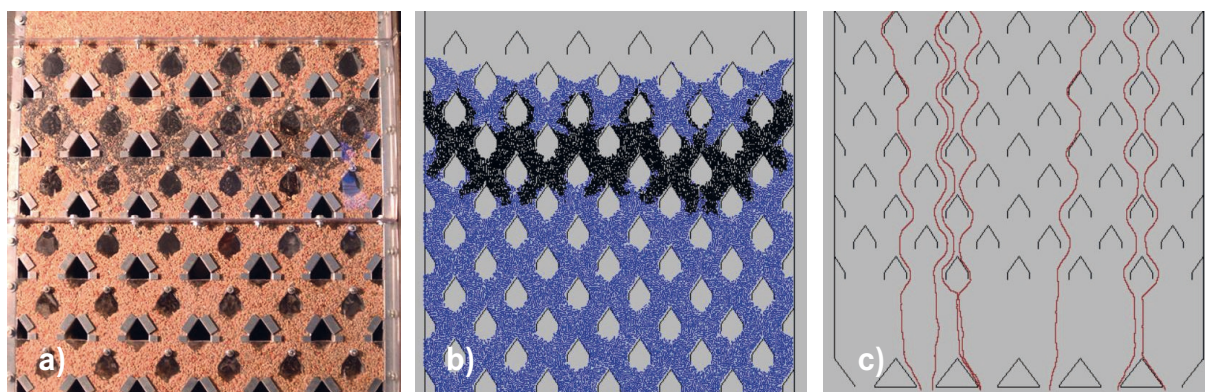


Abbildung 2: Partikelbewegung im Versuchstrockner: a) experimentell (© F. Weigler), b) numerisch und c) Partikeltrajektorien

Wie die Abbildungen 2a und b zeigen, weist die Kernströmungszone ein homogenes Strömungsprofil über einen weiten Bereich auf. Das Strömungsprofil wird durch Reibwiderstandseffekte zwischen den Partikeln und der Trocknerwand bzw. den Luftkanälen verursacht. Wie die Simulation der Partikelbahnen zeigt (Abbildung 2c), existieren Partikelstrahlen ohne jegliche Quervermischung zwischen den Dächern über der gesamten Trocknerhöhe. Die Untersuchungen zur Schüttbettbewegung zeigten jedoch auch ein ausgeprägtes Strömungsprofil über die Tiefe des Trockners. Durch die Möglichkeit in die Luftkanäle zu schauen, konnte auch die Partikelbewegung unterhalb der Kanäle im Inneren des Trockners untersucht werden. Es wurde beobachtet, dass sich Tracerpartikel innerhalb des Trockners viel schneller bewegen als diejenigen an der transparenten Acrylglas-Vorderwand und der Rückwand. Dies bedeutet, dass sich im DST ein Strömungsprofil über den gesamten Querschnitt ausbildet, das mit dem Kernfluss in einem Silo vergleichbar ist.

Trocknungsluftströmung

Es wurden numerische Simulationen des Trocknungsluftstroms in einem befüllten Trockner durchgeführt, um die Luftstromverteilungen für verschiedene Luftkanalanordnungen zu untersuchen (WEIGLER et al. 2012, SCAAR et al. 2016). Hierbei wurde angenommen, dass die Partikelbewegung während der Standzeit nicht von der Luftströmung beeinflusst wird. Die Standzeit setzt sich aus der Ruhezeit zwischen zwei Austragsvorgängen und der Zeit, die zum Öffnen und Schließen der Auslauftrichter benötigt wird, der sogenannten Austragszeit, zusammen (MELLMANN und TEODOROV 2011). Abbildung 3 zeigt die horizontale Konfiguration, bei der Reihen von Ein- und Auslassluftkanälen alternierend untereinander angeordnet sind. Die Zuluftkanäle sind mit „+“ und die Abluftkanäle mit „-“ gekennzeichnet.

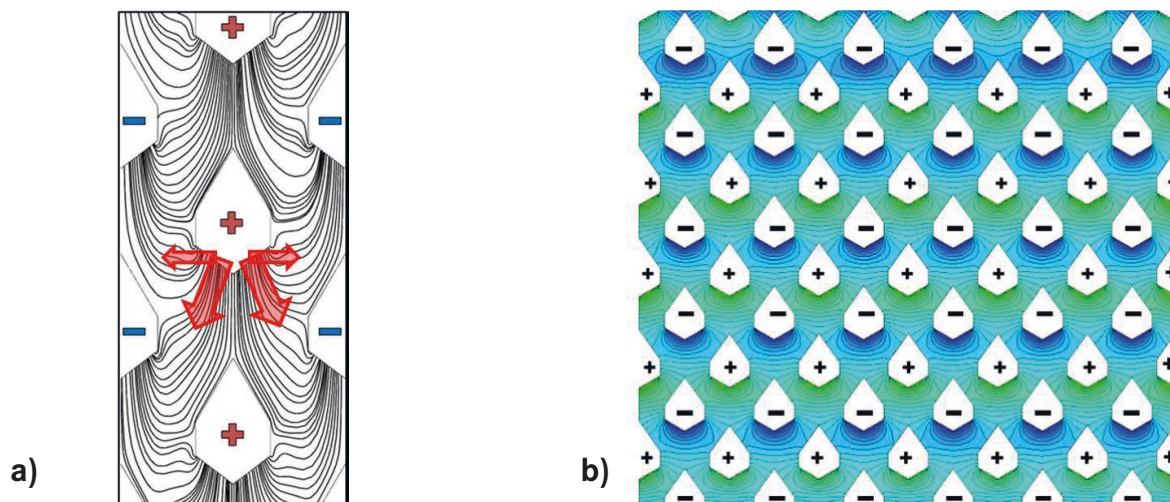


Abbildung 3: Simulierte Luftstromverteilung im Versuchstrockner mit horizontaler Anordnung der Luftkanäle: (a) Stromlinien-Darstellung und (b) Druckverteilung (statisches Schüttbett; Luftstromrate von $465 \text{ m}^3/\text{h}$), (+) Zuluft- und (-) Abluftkanäle.

Wie die numerischen Ergebnisse zeigen, ist die Luftstromverteilung in der horizontalen Anordnung homogen (nahezu konstantes Farbprofil). Wie CENKOWSKI et al. (1990) bereits durch Experimente zur Luftstömung nachgewiesen haben, wird bei der horizontalen Anordnung die einströmende Luft nicht gleichmäßig von einem Zuluftkanal an die vier angrenzenden Abluftkanäle verteilt. Die Teilluftströme zu den oberen Abluftkanälen sind jedoch nur geringfügig niedriger (40/60) als die zu den unteren Abluftkanälen. Dieser Effekt konnte anhand numerischer Untersuchungen durch WEIGLER et al. (2012) bestätigt werden (Abbildung 3a).

Trocknung

Unterschiedliche Partikelverweilzeiten zwischen der Mitte und den Wandbereichen führen zu einer ausgeprägten Partikelfeuchteverteilung am Trocknerausgang. Dieser Effekt verstärkt sich, je mehr sich die Partikelfluss- und die Luftstromgeschwindigkeiten, über den Querschnitt betrachtet, unterscheiden. Trocknungsexperimente wurden mit erntefrischem Weizen mit einem Anfangsfeuchtegehalt von $\sim 15 \text{ Gew.}\%$ durchgeführt. Die Trocknungsdauer betrug 90 min bei einem Trocknungsluftvolumenstrom von $465 \text{ m}^3/\text{h}$ und einer Zulufttemperatur von $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Ergebnisse der Trocknungsexperimente werden in Abbildung 4 gezeigt. Dargestellt ist die Gutfeuchte über dem Trocknerquerschnitt, die im stationären Betrieb am Auslauf des Trockners gemessen wurden. Die Experimente wurden an der oben beschriebenen Trocknergeometrie durchgeführt (Abbildung 1). Wie der Graph deutlich zeigt, schwankt die Partikelfeuchte über dem Trocknerquerschnitt.

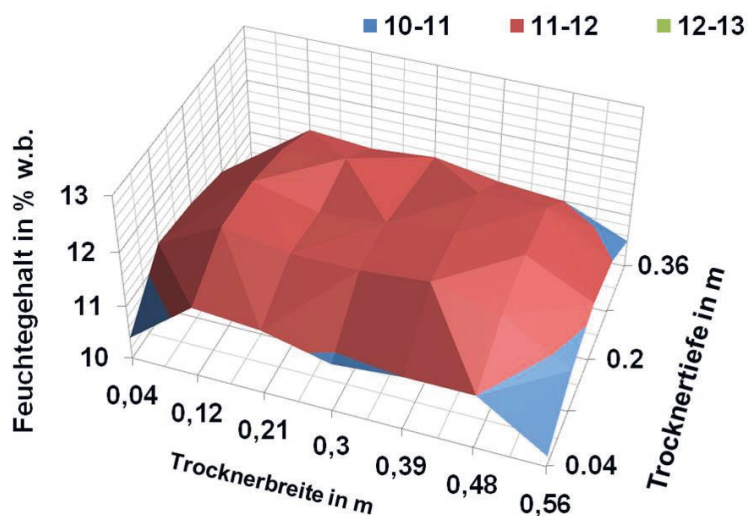


Abbildung 4: Durchschnittlicher Feuchtegehalt über dem Trocknerquerschnitt am Ausgang, gemessen im halbtechnischen Maßstab, siehe auch Abbildung 1

Für den Versuchstrockner variierte der Gutfeuchtegehalt über dem gesamten Querschnitt zwischen 10 und 13 Gew.-%. Wie erwartet, ist die Partikelfeuchte in Wandnähe und besonders in den Ecken des Trockners durch eine längere Partikelverweilzeit stark verringert. Dadurch können Strähnen von Getreidekörnern über- oder untergetrocknet werden, was bereits von GINER et al. (1998) beschrieben wurde. Die Folge davon ist, dass sich beim Trocknen eine ungleiche Feuchtigkeitsverteilung ergibt. Schon bei wenigen Feuchtenestern mit einem Partikelfeuchtegehalt von > 14,5 Gew.-% steigt das Risiko eines Qualitätsverlustes während der nachfolgenden Lagerung.

Trocknerentwicklung

Basierend auf den Forschungsergebnissen wurden von der Arbeitsgruppe „Trocknungstechnik“ des ATB Potsdam neue Trocknerkonstruktionen entwickelt und erfolgreich getestet. Die Entwicklung zielte darauf, die Ausnutzung des Trocknungspotenzials der Luft weiter zu verbessern, die Trocknungsbedingungen zu homogenisieren und somit die Trocknungseffizienz zu steigern. Im Folgenden werden zwei Beispiele für neue Dächerschachttrockner-Geometrien vorgestellt. Die neuen Ausführungen sind durch folgende konstruktive Merkmale charakterisiert:

- Änderung des Winkels der Luftdächer in Wandnähe – Beeinflussung der Schüttgutbewegung,
- Hinzufügen einer Reihe von geschlossenen Luftkanälen – Beeinflussung der Luftströmung.

Beeinflussung der Schüttbettbewegung

Wie die Untersuchungen der Partikelbewegung – sowohl experimentell als auch numerisch – ergaben, hat die Wandreibung einen großen Einfluss auf die Bewegung der Partikel im DST (Abbildung 2a). Die Ergebnisse zeigen, dass zwei Fließzonen existieren: eine zentrale Kernströmungszone und eine Zone in Wandnähe. Körner in der Mitte des Trockners haben höhere Geschwindigkeiten und werden schneller ausgetragen, während Körner in der Nähe der Seitenwände aufgrund von Reibungseffekten zwischen den Partikeln und Seitenwänden und/oder durch Dacheinbauten geringere Fließgeschwindigkeiten haben (IROBA et al. 2011a).

Eine neue Trocknergeometrie, die am ATB Potsdam entwickelt wurde, basiert auf der klassischen horizontalen Luftkanalanordnung, bei der in dem vertikalen Trocknungsschacht die Lufteinlass- und Luftauslassdächer horizontal versetzt angeordnet sind. Anders als bei der klassischen Dachgeometrie, bei der alle Luftkanäle im Querschnitt spiegelsymmetrisch sind (Abbildung 5), ist die neu entwickelte Dachgeometrie asymmetrisch. Diese Luftkanäle sind jeweils an den Seitenwänden eingebaut (Abbildung 6). Das ungleichseitige Dreieck an der Spitze des Kanalquerschnitts wird durch eine Verkleinerung des Dachneigungswinkels α der der Seitenwand zugewandten Dachhälfte hervorgerufen. Luftkanäle mit dieser veränderten Geometrie werden jedoch nur entlang vertikaler, wandnaher Dachreihen angeordnet (Abbildung 6b); durch die Verringerung der Wandreibungswinkel beschleunigen sie den Partikelfluss. Die Idee ist, Partikelströme durch Variation ihres effektiven Reibungswinkels zu beschleunigen oder zu verlangsamen, um ein gleichmäßiges Strömungsprofil zu erhalten.

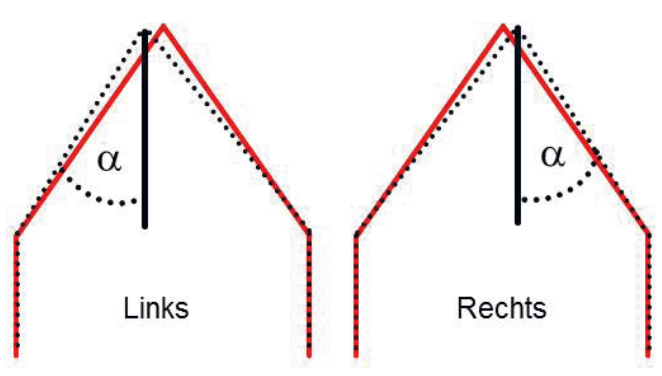


Abbildung 5: Geometrische Darstellung und qualitativer Vergleich der ursprünglichen (rote Linie) und der neu entwickelten Dachgeometrie (gepunktete Linie)

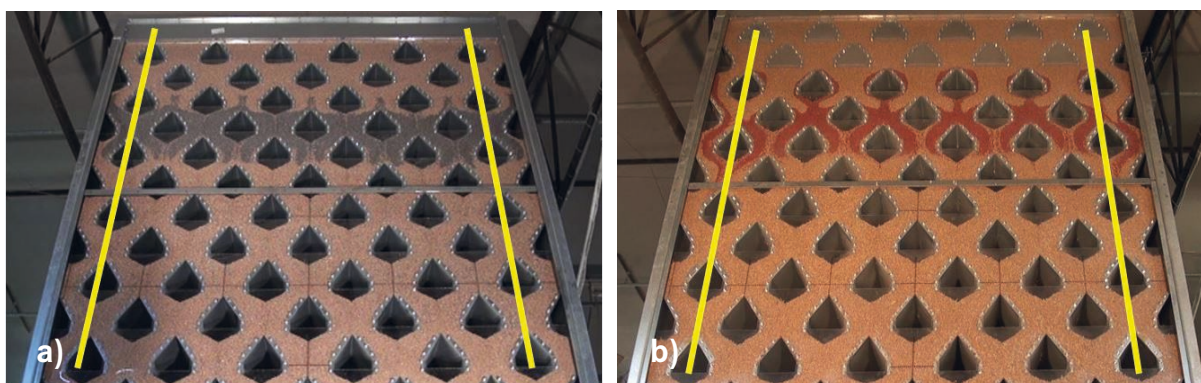


Abbildung 6: Experimentell gemessene Partikelfluss-Profile für (a) herkömmliche Luftkanäle und (b) neu entwickelte Luftkanäle mit veränderten Dachwinkeln in Wandnähe (© F. Weigler)

Diese Entwicklung hat mehrere Vorteile: Das Trocknungspotenzial der Luft, die durch die Bereiche nahe der Wand strömt, wird bei weitem besser ausgenutzt, denn die Trocknungsbedingungen werden homogenisiert, wodurch die Trocknungseffizienz steigt. Mit dieser Anordnung ist eine systematische Erhöhung der Partikelgeschwindigkeit in der Nähe der Trocknerwände möglich, da die steilere Dachneigung den effektiven Reibungswinkel des Schüttgutes herabsetzt und somit dem Wandreibungseffekt entgegenwirkt. In Abbildung 6b ist der Einfluss der neu entwickelten Luftkanäle

le beispielweise daran sichtbar, dass die homogene Kernströmungszone in der Mitte des Trockners zu den Seitenwänden hin erweitert worden ist. Dieses Strömungsmuster wurde in halbtechnischen Partikelflussexperimenten ermittelt. Durch Anpassen der Partikelgeschwindigkeit in den wandnahen Bereichen und in der Trocknermitte werden die Gleichmäßigkeit der Trocknung und die Kornfeuchteverteilung über den gesamten Querschnitt hinweg homogenisiert. Mit einer homogeneren Trocknung kann Energie eingespart und die Produktqualität verbessert werden. Diese Trocknerausführung wurde erfolgreich auf industrielle Dimension skaliert und wird als Konfiguration während der Ernteperiode 2018 in Zusammenarbeit mit der NEUERO Farm- und Fördertechnik GmbH validiert.

Beeinflussung der Trocknungsluftströmung

Die Untersuchungen der Trocknungsluftströmung für die horizontale Anordnung der Luftkanäle zeigt, dass die Luft von einem Zuluftdach (+) zu den umliegenden 4 Abluftkanäle (-) strömt (Abbildung 3a). Dabei kommt es jedoch zu einer Ungleichverteilung der Trocknungsluft zwischen den zwei Abluftdächern, die ober- und unterhalb des Zuluftdaches liegen. Bei DST mit einer herkömmlichen horizontalen Luftkanalanordnung (Abbildung 3b) entstehen aufgrund der geringen Quervermischung und der übereinander angeordneten Zuluft- und Abluftkanäle vertikale Partikelstrahlen mit feuchten Körnern (MELLMANN et al. 2011). Um diesem Effekt entgegenzuwirken, werden bei mehreren Trocknerherstellern die Trocknersektionen gedreht (MELLMANN et al. 2016) (Abbildung 6a). Dafür werden gleich aufgebaute Trocknersektionen abwechselnd um ihre vertikale Achse um 180° über der gesamten Höhe des Trockners gedreht. Die Drehung der Sektionen bewirkt eine veränderte Umströmung der Zuluft- und Abluftkanäle durch das Getreide. Dadurch werden einzelne Getreidestrahlen regelmäßig von heißer Zuluft oder kalter bzw. relativ feuchter Abluft durchströmt, was zu einer gleichmäßigeren Trocknung führt.

Ein wesentlicher Nachteil dieses Verfahrens ist jedoch die direkte Abfolge von zwei horizontalen Reihen von Zuluft- bzw. Abluftkanälen an den Schnittstellen der verdrehten Trocknungssektionen. Dadurch entstehen lokal Bereiche mit erhöhten Luftgeschwindigkeiten aufgrund von Zuluftüberschuss (zu viele Zuluftkanäle) bzw. Bereiche mit niedrigeren Luftgeschwindigkeiten (Totzonen), in denen Luft im Überschuss abgesaugt wird (zu viele Abluftkanäle) (Abbildung 6a). In diesen Bereichen wird die Strömungsverteilung folglich inhomogen und die klassische Vierteilung der Zuluft wird unterbrochen. Das Trocknungspotenzial der Zuluft wird nicht ausgenutzt. Bei einer weiteren Konfiguration der Luftkanäle werden Zu- und Abluftkanäle sequenziell diagonal angeordnet. Dabei zeigt sich, dass der Luftstrom ungleichmäßig auf die umliegenden Abluftdächer verteilt wird (SCAAR et al. 2016). Dadurch kommt es innerhalb des Trockners zu einer Ausbildung von strömungsarmen und strömungsintensiven Bereichen. Daher sind die maximalen Luftgeschwindigkeiten in der diagonalen Konfiguration höher als in der horizontalen Konfiguration. Auch in der diagonalen Anordnung kann die Ausnutzung des Trocknungspotenzial der Zuluft nicht gesteigert werden.

Daher wurde eine neue Ausführung des DST basierend auf der horizontalen Luftkanalanordnung entwickelt (SCAAR et al. 2015), bei der jede Trocknungssektion um eine Reihe geschlossener Luftkanäle am unteren Ende erweitert wird (Abbildung 7b). Kürzlich schlug OKSANEN (2018) ein ähnliches Design vor, um die Verweilzeit der Luft zu erhöhen und das Trocknungspotenzial besser auszuschöpfen. In diesem Fall folgte auf jede Reihe von Zuluft- und Abluftkanälen eine Reihe von geschlossenen Kanälen.

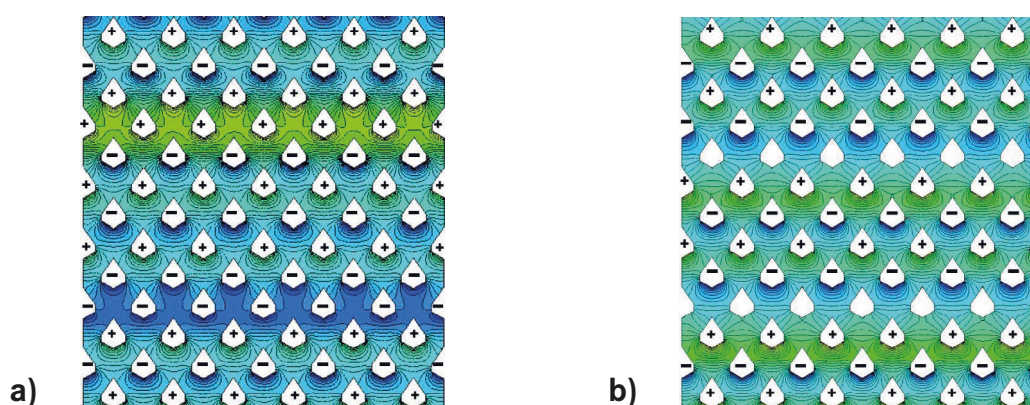


Abbildung 7: Druckverteilung im DST für (a) horizontale Anordnung der Luftkanäle mit verdrehten Sektionen und (b) das neue Design mit einer Reihe geschlossener Kanäle pro Trocknersektion, simuliert mit einer Luftstromrate von $465 \text{ m}^3/\text{h}$

Wie in Abbildung 7b ersichtlich ist, besteht eine identische Trocknungssektion aus insgesamt fünf Reihen von Luftkanälen: jeweils zwei Reihen für Zuluft und Abluft und eine Reihe mit geschlossenen Kanälen. Das Einbringen einer geschlossenen (nicht durchströmten) Dachreihe in jeder Trocknungssektion bietet verschiedene Vorteile:

- Erzeugung einer Ausgleichszone am Ende jeder Trocknersektion,
- Beibehaltung der homogenen Luftstromverteilung,
- überwiegende Vierteilung der Luftströmung jedes Zuluftkanals (Abbildung 3a).

Die Ausgleichszone am Ende jeder Trocknersektion ermöglicht eine Feuchtigkeits- und Temperaturkompensation im Kornbett und beschleunigt dadurch die Trocknung in der nächsten Sektion. Die Bildung von Zonen mit geringer Luftströmung (Totzonen) wird verhindert, Feuchtigkeits- und Temperatursträhnen durch Unter- oder Übertrocknung werden vermieden. Mit der neu entwickelten Anordnung werden gleichmäßige Trocknungsbedingungen für Getreidekörner verschiedener Trajektorien erreicht. Dies konnte durch halbtechnische Trocknungsexperimente bestätigt werden, bei denen die Kornfeuchte- und Temperaturverteilungen im Vergleich zum herkömmlichen Trocknerdesign signifikant homogenisiert wurden. Das neue Design wurde auf eine industrielle Anlage übertragen, die derzeit erprobt wird.

Schlussfolgerungen

Bei der Trocknung in DST können durch die Verfahrensanalyse und die Optimierung der Trocknergestaltung Fortschritte in der Prozess- und Produktqualität erzielt werden. Basierend auf experimentellen und numerischen Untersuchungen zum Partikelfluss, zur Luftströmung und Partikel-trocknung

mittels DEM und CFD wurden verschiedene innovative DST-Trocknerkonfigurationen von der Arbeitsgruppe Trocknungstechnik des ATB Potsdam entwickelt. Zwei dieser Konfigurationen wurden in diesem Artikel vorgestellt. Erste Ergebnisse zeigen, dass mit den neuen Trocknerausführungen die Trocknungsbedingungen vergleichmäßigt werden, die Bildung von Strähnen bezüglich der Kornfeuchte und -temperatur vermindert und die Kornfeuchteverteilung nach der Trocknung homogenisiert wird. Dadurch kann potenziell thermische Energie eingespart, die Produktqualität verbessert und die Betriebssicherheit erhöht werden. Beide Konstruktionen wurden auf industrielle Dimensionen skaliert und werden derzeit in laufenden Forschungsprojekten erprobt.

Literatur

- Brooker, D.B.; Bakker-Arkema, F.W.; Hall, C.W. (1992): *Drying and Storage of Grains and Oilseeds*. Van Nostrand Reinhold: New York
- 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
- Centkowski, S.; Miketinac, M.; Kelm, A. (1990): Airflow patterns in a mixed-flow dryer. *Journal of Canadian Agricultural Engineering* 32, pp. 85–90
- Courtois, F.; Nouafo, J.L.; Trystram, G. (1995): Control strategies for corn mixed-flow dryers. *Drying Technology* 13, pp. 147–164
- Das, S.K.; Chakraverty, A. (2003): Grain-Drying Systems. In: *Handbook of Postharvest Technology*, Chakraverty, A.; Mujumdar, A.S.; Vijaya Raghavan, G.S.; Ramaswamy, H.S. (Eds.), Marcel Dekker Inc.: New York, pp. 139–166
- Giner, S.A.; Bruce, D.M.; Mortimore, S. (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
- Iroba, K.L.; Weigler F, Mellmann, J.; Metzger, T.; Tsotsas, E. (2011a): Residence time distribution in mixed-flow grain dryers. *Drying Technology* 29(11), pp. 1252–1266
- Iroba, K.L.; Mellmann, J.; Weigler, F.; Metzger, T.; Tsotsas, E. (2011b): Particle velocity profiles and residence time distribution in mixed-flow grain dryers. *Granular Matter* 13(2), pp. 159–168
- Keppler, I.; Kocsis, L.; Oldal, I.; Farkas, I.; Csatar, A. (2012): Grain velocity distribution in a mixed-flow dryer. *Advanced Powder Technology* 23(6), pp. 824–832
- Kocsis, L.; Teodorov, T.; Mellmann, J.; Gottschalk, K.; Mészáros, C.; Farkas, I. (2008): Analysis of Grain Mass Flow Experiments in a Mixed-Flow Dryer. In: *Proceedings of the 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC 2008)*, July 6–11, Seoul, Korea, pp. 1608–1612
- Liu, Q. (1993): Study on the drying mechanism, simulation and test of mixed-flow grain dryer. Ph.D. thesis, Beijing, China, Beijing Agricultural Engineering University
- Liu, H.; Zhang, J.; Tang, X.; Lu, Y. (2003): Fuzzy control of mixed-flow grain dryer. *Drying Technology* 21, pp. 807–819
- Mellmann, J.; Richter, I.-G.; Maltry, W. (2007): Experiments on hot-air drying of wheat in a semi-technical mixed-flow dryer. *Drying Technology* 25, pp. 1287–1295
- 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
- Mellmann, J.; Teodorov, T. (2011): Solids transport in mixed-flow dryers. *Powder Technology* 205, pp. 117–125
- Mellmann, J.; Scaar, H.; Weigler, F.; Franke, G. (2016): Effect of the air-duct arrangement on homogeneity of drying in mixed-flow grain dryers. In: *Proceedings of the 20th International Drying Symposium (IDS 2016)*, Gifu, Japan, 7–10 August, pp. 1–6
- Mühlbauer, W. (2009): *Handbuch der Getreidetrocknung – Grundlagen und Verfahren*. Agrimedia Verlag
- Oksanen, T. (2018): Controlling air flow in recirculating mixed flow batch dryer with double bed mode. *Computers and Electronics in Agriculture* 149, pp. 133–138

- Olesen, T. (1987): Grain drying. Innovation Development Engineering ApS. Thisted, Denmark, Polyteknisk Forlag: Lyngby, Denmark
- Pabis, S.; Jayas, D.S.; Cenkowski, S. (1998): Grain Drying. Wiley & Sons, New York
- Scaar, H.; Franke, G.; Weigler, F.; Mellmann, J. (2015): Dächerschachttrockner / Mixed-flow dryer. Patent No. DE 102014107280 B3, declared 23.05.2014, published 09.04.2015, Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB), Potsdam
- Scaar, H.; Franke, G.; Weigler, F.; Delele, M.A.; Tsotsas, E.; Mellmann, J. (2016): Experimental and numerical study of the airflow distribution in mixed-flow grain dryers. *Drying Technology* 34(5), pp. 595–607
- 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

Autoren

Dr.-Ing. Fabian Weigler ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule Anhalt – FB 7, **Dipl.-Ing. (FH) Holger Scaar** ist Doktorand am ATB und **Dr.-Ing. Jochen Mellmann** Leiter der Arbeitsgruppe Trocknung am Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB), Abteilung Technik der Aufbereitung, Lagerung und Konservierung, Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam, E-Mail: fabian.weigler@hs-anhalt.de.

Dipl.-Ing. (FH) Georg Franke ist wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der IFF Braunschweig, Frickenmühle 1A, 38110 Braunschweig.

Dipl.-Ing. (FH) Harald Kuhlmann und **Arno Grothaus** sind Mitarbeiter der NEUERO Farm- und Fördertechnik GmbH, Alter Handelsweg 11, 49328 Melle-Buer.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) für die Förderung im Rahmen der Deutschen Innovationspartnerschaft Agrar/DIP (Projekt „InnoTrEnt“, FKZ: 744170/1).