

# Kontrollierte Entleerung mit ganzflächigen Austrageinrichtungen

Georg Franke, Fabian Weigler, Jochen Mellmann, Peter Müller

Bei der Entleerung komplexer Schüttgutapparate und Silos kann die Austrageinrichtung am Behälterboden einen erheblichen Einfluss auf den Energiebedarf des Prozesses und die Produktqualität nehmen. In der Praxis hat sich eine Vielzahl von Austrageinrichtungen entwickelt, die sich nach Art ihres Verschleißmechanismus und der Gestaltung ihrer feststehenden Einbauten unterscheiden. Experimentelle Untersuchungen am Schüttgut Weizen haben gezeigt, dass einige ganzflächige Austrageinrichtungen zu ausgeprägten Fließprofilen führen. Aufgrund ihres konstruktiven Aufbaus bieten derartige Systeme ein bislang ungenutztes Potenzial, die Schüttgutbewegung örtlich zu beeinflussen und eine kontrollierte Entleerung umzusetzen. Auf der Grundlage eines Prototyps wird am Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB) eine neuartige Austrageinrichtung entwickelt. Erste Untersuchungen haben gezeigt, dass feststehende Leitorgane an den Wänden zu einer verlangsamten Entleerung am Rand der Austrageinrichtung führen. Der gänzliche Verzicht auf diese Einbauten führt hingegen zu einer starken Beschleunigung in den wandnahen Regionen. Durch eine optimierte Gestaltung feststehender Einbauten soll es zukünftig möglich sein, die Schüttgutbewegung örtlich über den Verschleißmechanismus zu steuern. Darüber hinaus soll mit der neuartigen Austrageinrichtung untersucht werden, inwieweit sich auch der Trocknungsverlauf in Getreide-Durchlaufrocknern beeinflussen und vergleichmäßigen lässt.

## Schlüsselwörter

Behälterentleerung, Schüttgutbewegung, Austrageinrichtung, Fließprobleme, Entleerungssystem

Die Austragung von Schüttgütern aus Silos und Trocknungsapparaten spielt für den Qualitätserhalt von Ernteprodukten eine entscheidende Rolle. Bei der Lagerung kann ein ungleichmäßiger Schüttgutabzug zur Schimmelbildung im Behälter und damit zum Verderb führen. In Aufbereitungsprozessen wie der Trocknung von landwirtschaftlichen Gütern verursachen ungünstig gestaltete Austrageinrichtungen ausgeprägte Geschwindigkeitsprofile, während sich das Schüttgut durch die Trocknersäule bewegt (WEIGLER et al. 2014). Das hat zur Folge, dass die Prozessbedingungen über dem Apparatequerschnitt variieren und es trotz optimierter Apparategestaltung und ganzflächiger Austragung zur Schädigung essenzieller Inhaltsstoffe kommen kann (WASSERMANN und MÜHLBAUER 1980). Im Gegensatz zu konventionellen Austrageinrichtungen unterhalb des Auslauftrichters (z. B. Zellenradschleuse, Schieber) bieten ganzflächige Austrageinrichtungen eine Vielzahl an Möglichkeiten einen Behälter kontrolliert zu entleeren.

Austrageinrichtungen werden oftmals in Verbindung mit ihrem darüberliegenden Auslauftrichter diskutiert. Beide Systeme stehen in direktem Zusammenhang und müssen auf das jeweilige Ernteprodukt angepasst werden. Über den Auslauftrichter und die auf die Behälterwand ausgeübten Schubspannungen des Schüttguts kann ein erheblicher Teil der Last noch oberhalb der Austragein-

richtung mit ihren beweglichen Teilen aufgenommen werden. Bei der Entleerung eines Silos charakterisieren die Begriffe Massenfluss und Kernfluss die Fließprofile, die sich durch einen zu flach oder zu steil gewählten Neigungswinkel des Trichters oder aufgrund einer ungünstigen Dimensionierung des Auslaufquerschnitts einstellen können. Massenfluss ist dadurch gekennzeichnet, dass sich der gesamte Behälterinhalt in Bewegung setzt und sich keine „toten Zonen“ ausbilden (SCHULZE 2014). Bei einigen Aufbereitungsprozessen genügt es jedoch nicht, nur Massenfluss zu erreichen. Hier werden darüber hinaus Anforderungen an ein möglichst gleichmäßiges Fließprofil über den gesamten Apparatequerschnitt gestellt. Damit verbunden ist eine möglichst geringe Streuung der Verweilzeit des Schüttguts während des Prozesses, um z. B. einheitliche Trocknungs- oder Kühlzeiten für ein homogenes Ausgangsprodukt sicherzustellen.

Bei solchen Anlagen verzichtet man daher oft auf einen Auslauftrichter und versucht das Schüttgut möglichst ganzflächig auszutragen (TEODOROV et al. 2011). Die ganzflächige Entleerung eines Behälters kann je nach geometrischer Grundform der Querschnittsfläche indirekt über rotierende oder transversal bewegte Räumvorrichtungen erfolgen oder durch den direkten Abzug mithilfe parallel liegender Schneckenwellen, Drehbalken bzw. mehrerer, parallel liegender Auslauftrichter mit Absperrvorrichtung (Abbildung 1).

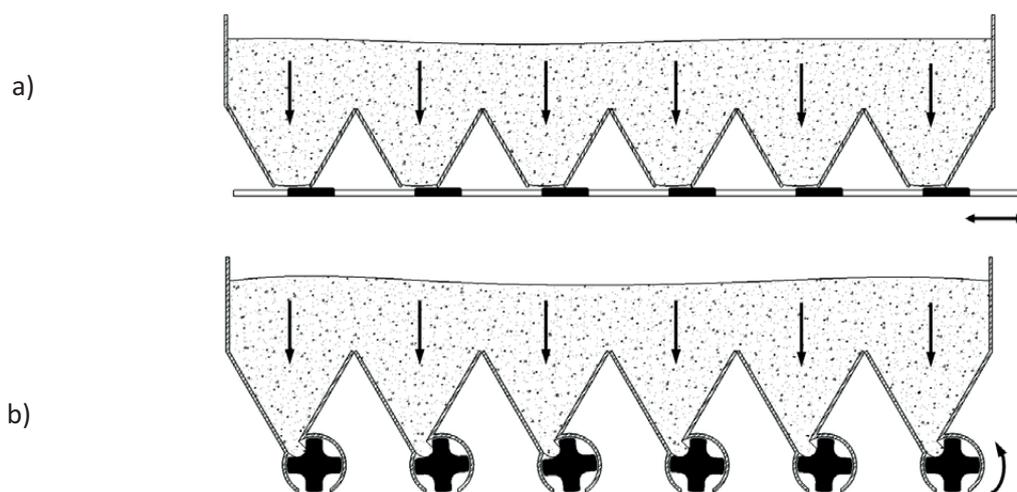


Abbildung 1: Ganzflächige Austrageinrichtungen für rechteckige Apparatequerschnitte mit parallel liegenden Trichtern und Absperrvorrichtung: a) Flachschieber, b) Zellenradschleusen

Das Schüttgut soll sich dadurch pfpfenstromartig in Richtung der Auswurföffnungen bewegen. Reihenweise angeordnete Schneckenwellen haben sich vor allem zur Austragung kohäsiver Schüttgüter bewährt (EBERLE 2013). Die Anordnung mehrerer, über den Behälterquerschnitt verteilter Auslauftrichter eignet sich vorrangig für leicht fließfähige bzw. rieselfähige Schüttgüter wie Weizen, Raps oder Mais in rechteckigen Apparaten. Aus diesem Grund findet man derartige Austrageinrichtungen häufig an Durchlauftrocknern für Getreide. Untersuchungen haben gezeigt, dass sich durch die Verteilung von mehreren kleinen Auslauftrichtern eine kontrollierte Entleerung umsetzen lässt. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass sowohl die Gestaltung der Trichter als auch die Fahrweise des Absperrorgans einen erheblichen Einfluss auf das Fließprofil des Schüttguts im darüberliegenden Behälter nehmen (FRANKE et al. 2015). Die Praxis zeigt jedoch, dass ganzflächige Austrageinrichtungen noch immer Optimierungspotenzial beinhalten und sich bei einer ungünstigen konstruktiven Ge-

staltung mitunter stark ausgeprägte Fließprofile ausbilden können, die sich weder dem klassischen Kernfluss noch dem idealen Massenfluss zuordnen lassen.

### Herausforderungen der ganzflächigen Entleerung

Im Gegensatz zum konventionellen Silotrichter verteilen sich die Ausläufe bei ganzflächigen Austrageinrichtungen in Form einer Vielzahl rechteckiger Öffnungsschlitze über der Behälterbreite. Zur Vermeidung von Brückenbildung und Verstopfungen werden die Schlitzweiten unter Berücksichtigung der Brückenaufspannungen dimensioniert (STIESS 1995). Die Neigungswinkel aller Auslauftrichter können entsprechend den Grenzen für Massen- und Kernfluss nach Jenike (BOHNET 2004) für den keilförmigen Trichter eingestellt werden. Massenfluss ist zunächst einmal die Grundvoraussetzung, um ein gleichmäßiges Fließprofil im Behälter einzustellen. Obgleich derartige Austrageinrichtungen hinreichend genau auf die Fließeigenschaften eines Schüttguts ausgelegt werden und alle Verschleißmechanismen eine gleichmäßige Freigabe der Öffnungsschlitze umsetzen, kann praktisch kein idealer Kolbenfluss der Schüttgutbewegung festgestellt werden (Abbildung 2).

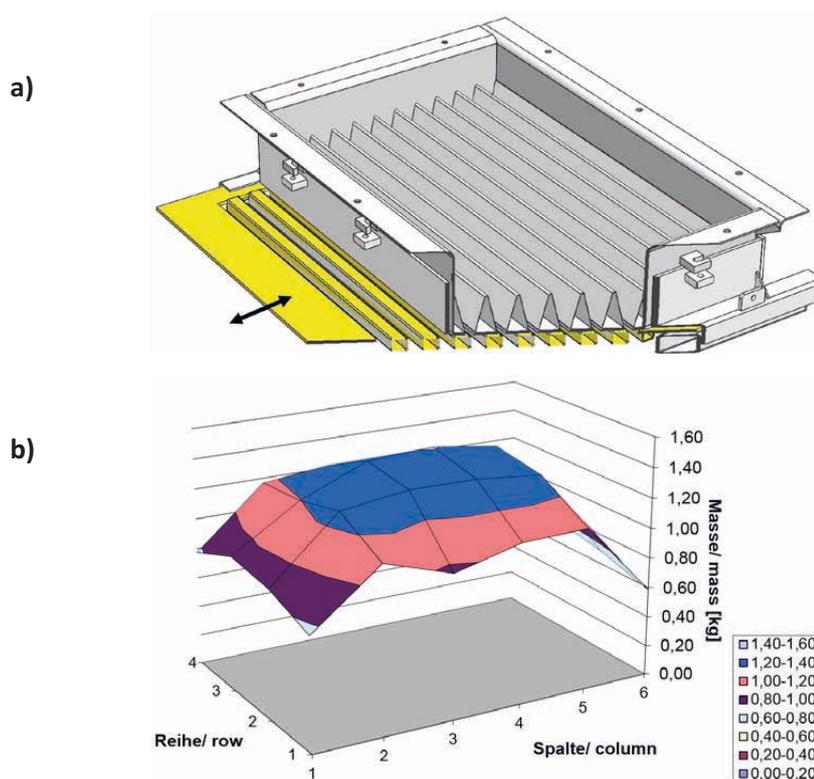


Abbildung 2: a) 3D-Schnittdarstellung einer ganzflächigen Austrageinrichtung (600 x 400 mm) mit Flachschieber, b) Verteilung der Austragsmasse über den Querschnitt, Öffnungszeit 2 s

Hersteller und Anlagenbetreiber wissen, dass ein Schüttgutapparat oder Silo normalerweise nicht für verschiedene Produkte ausgelegt ist. Jedes Produkt besitzt spezifische Fließeigenschaften und stellt daher unterschiedliche Anforderungen an die Behälter- und Austragsgestaltung. Diese können sich darüber hinaus noch im Verlauf eines Aufbereitungsprozesses ändern. Einem Schüttgut wie z. B. Weizen oder Mais wird im Laufe eines Trocknungsprozesses Wasser entzogen. Dadurch neigt es

dazu, am Ende des Trocknungsprozesses deutlich besser zu fließen. Weiterhin unterliegt das Schüttgut in der Nähe der Behälterwände anderen Einflüssen als in der Mitte des Apparates. Aufgrund von Reibungseffekten werden die Schubkräfte des Schüttguts in so großem Maß an die Wand übertragen, dass die Fließgeschwindigkeit hier trotz gleichzeitiger Freigabe aller Auslauftrichter messbar langsamer ist. Bei rechteckigen Behältern ist das vor allem in den Ecken deutlich festzustellen. Durch Einbauten an den Wänden kann dieser Effekt noch zusätzlich verstärkt werden. In experimentellen Versuchsreihen und numerischen Simulationen werden diese Zusammenhänge derzeit genauer untersucht und Lösungsansätze verfolgt, mit denen sich die Arbeitsweise der Austrageinrichtung örtlich auf die Fließgeschwindigkeit im Behälter einstellen lässt.

### Experimentelle Untersuchungen

Ganzflächige Austrageinrichtungen besitzen unterschiedliche Verschleißmechanismen unterhalb ihrer parallel liegenden Auslauftrichter. Neben dem einfachen Schieber mit länglichen Schlitzfenstern, können sowohl Walzen- und Zellenradschleusen als auch Klappen, Pendel und Kippmulden einen unkontrollierten Auslauf aus dem Behälter verhindern (FRANKE et al. 2015). Dabei hat jedes dieser Entleerungsprinzipien seine Vor- und Nachteile. Durch die Vielzahl an Möglichkeiten, die Auslaufdimensionen, die Neigungswinkel, die Anzahl der Trichter und die Auswahl des Verschleißmechanismus auf das Schüttgut anzupassen, ist es nicht ohne Weiteres möglich, alle Systeme direkt miteinander zu vergleichen. In der vorliegenden Arbeit wird das charakteristische Zusammenspiel zwischen Austrag und Schüttgutbewegung am Beispiel von drei unterschiedlichen Austragsystemen dargestellt. Hierzu wurden experimentelle Untersuchungen zum Auslaufverhalten durchgeführt.

### Einfache Schieber-Austrageinrichtung

Bei einfachen Schieber- oder Schlitzbodenaustragsystemen wird der Verschleißmechanismus über einen pneumatisch oder hydraulisch betriebenen Zylinder in horizontaler Richtung bewegt. Mit diesem Prinzip lässt sich sowohl eine kontinuierliche als auch eine hubweise Entleerung durch die zeitgleiche Freigabe aller Auslaufquerschnitte umsetzen. In einem Versuch mit Weizen mit einer Feuchte von 14 % w. b. (wet basis) wurde die Austragsmasse lokal mittels einer reihen- und spaltweisen Anordnung von Probenbehältern unterhalb des Austragsystems bestimmt (Abbildung 2b). Die Öffnungsdauer wurde auf 2 Sekunden festgelegt, da sich so für einen kurzen Moment ein konstanter Massenstrom einstellen konnte (TEODOROV et al. 2011). Aus der Massenverteilung unterhalb der Austrageinrichtung lassen sich Rückschlüsse auf ein Geschwindigkeitsprofil innerhalb des Behälters ziehen. Das Ergebnis dieses Versuches zeigt, dass die Fließgeschwindigkeit innerhalb der Kernzone des Behälters wesentlich stärker ausgeprägt ist als am Rand. In den Randbereichen wurde bei gleicher Öffnungsdauer deutlich weniger Weizen ausgetragen. Alle Auslauftrichter sind hinsichtlich Massenausfluss ausgelegt und besitzen einheitliche Neigungswinkel. Da auch der Verschleißmechanismus eine gleichzeitige Freigabe aller Öffnungsschlitze gewährleistet, kann das stark ausgeprägte Fließprofil nur auf den Einfluss der Behälterwände zurückzuführen sein. Aufgrund der Reibung werden Schubkräfte des Schüttguts an die Wand übertragen. Dieser Effekt bremst das Schüttgut. Mit einer Wandbeschichtung könnte die Reibung minimiert werden. Dies ist jedoch im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit bei der Getreidetrocknung praktisch nicht umsetzbar. Daher wurden Lösungsansätze verfolgt, mit denen die Arbeits- und Gestaltungsweise der Austrageinrichtung dem Fließverhalten angepasst werden kann.

### Doppelschieber-Austrageinrichtung

Durch Variation der Neigungswinkel parallel angeordneter Auslauftrichter können die Auslaufgeschwindigkeiten am Rand und in der Mitte des Behälters gezielt beeinflusst werden. Um beispielsweise einer höheren Fließgeschwindigkeit in der Mitte des Behälters entgegenzuwirken, können spezielle Einbauten - ähnlich dem Konus im Silotrichter - verwendet werden. Darüber hinaus kann über die örtliche Ansteuerung von Verschleißmechanismen eine bevorzugte Entleerung am Rand oder in der Mitte des Behälters umgesetzt werden (WEHRY und PAHL 2005). Von der Arbeitsgruppe Trocknungstechnik des Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e. V. (ATB) wurden diese Ansätze aufgegriffen, und ein Prototyp eines „Doppelschieber-Austragsystems“ aufgebaut (Abbildung 3). Dieses System besitzt zwei getrennt voneinander gelagerte Verschleißmechanismen (Schieberböden), mit denen die Rand- (grün) und Kernzone (rot) der Austragswanne unabhängig voneinander freigegeben werden kann. Auf diese Weise lässt sich die Öffnungszeit für jede Zone individuell einstellen. Die Austragswanne verfügt über insgesamt 56 einheitlich dimensionierte Auslauftrichter (30 in der Kernzone, 26 in der Randzone), die eine Abgrenzung beider Zonen technisch ermöglichen. Die Neigungswinkel der Trichterflanken wurde in Längsrichtung der Austragswanne zu  $\theta_1 = 25^\circ$  und in Querrichtung zu  $\theta_2 = 15^\circ$  gewählt. Jeder Auslauftrichter besitzt damit eine Öffnungsfläche von  $0,0013 \text{ m}^2$ .

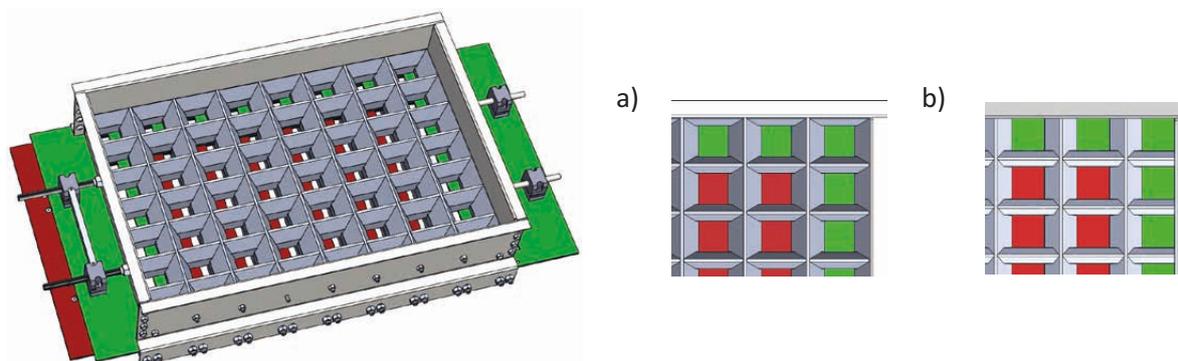


Abbildung 3: Prototyp der Doppelschieber-Austrageinrichtung;  
a) mit Leitblechen am Rand, b) senkrechte Seitenwände (ohne Leitbleche)

Bevor der lokale Einfluss unterschiedlicher Öffnungszeiten auf das Fließprofil untersucht wurde, mussten zunächst die Zusammenhänge zwischen der Aufteilung der Trichter und der Schüttgutbewegung bekannt sein. Untersucht wurden daher zwei Varianten des Prototyps, um zunächst nur den Einfluss der konstruktiven Gestaltung zu verstehen. Variante 1 entspricht der o. g. einheitlichen Aufteilung aller Auslauftrichter mit den jeweiligen Neigungswinkeln der Trichterflanken (Abbildung 3, a). In Variante 2 wurden die Leitbleche am Rand der Austragswanne weggelassen (Abbildung 3, b). Das heißt, die Auslauftrichter der Randzone besitzen senkrechte Außenflanken. Diese Varianten wurden gewählt, um die Fließbewegung in den wandnahen Bereichen des Schüttgutapparates zu beschleunigen. Durch die konstruktive Veränderung vergrößerte sich die Öffnungsfläche aller Auslauftrichter auf je  $0,0016 \text{ m}^2$ . In einem ersten Versuch mit Weizen wurde zunächst nur die Austragswanne ( $600 \times 400 \times 150 \text{ mm}$ ) gleichmäßig mit Material gefüllt. Beide Austragsschieber wurden synchron bewegt. Durch die einheitliche Öffnungszeit (1,5 Sekunden, 1 Hub) aller Auslauftrichter ergab sich für

beide Varianten ein repräsentatives Fließprofil, das den Einfluss der Leitbleche am Rand eindeutig charakterisiert. Ähnlich dem Auslaufverhalten der bereits diskutierten einfachen Schieber-Austrageeinrichtung, wurde bei Variante 1 (Abbildung 4, a) ein größerer Massenaustrag in der Kernzone der Austragswanne beobachtet. In der Randzone hingegen waren die Auslauftrichter am Ende des Versuchs noch immer mit Weizen befüllt. Bei Variante 2 des Doppelschiebersystems ergab sich im Gegensatz dazu ein vollständig anderes Fließprofil. Die Kernzone hob sich durch einen ausgeprägten Schüttkegel deutlich von der Randzone ab (Abbildung 4, b), deren Auslauftrichter gegen Ende des Auslaufversuches nur noch einen geringen Füllgrad besaßen. Das Ergebnis dieses Experiments zeigt, dass die Bremswirkung der Reibungskräfte in Verbindung mit den Leitblechen an den Seitenwänden zu einer Verlangsamung der Schüttgutbewegung in der Randzone führt. Der Verzicht auf diese Leitbleche verursacht eine unkontrollierbar schnelle Entleerung der Randzone. Dies macht deutlich, dass derartige Einbauten unverzichtbarer Bestandteil der Austraggestaltung sind. Ziel weiterführender Untersuchungen ist deshalb, die Schüttgutbewegung in Rand- und Kernzone durch Variation der jeweiligen Öffnungszeiten zu beeinflussen.

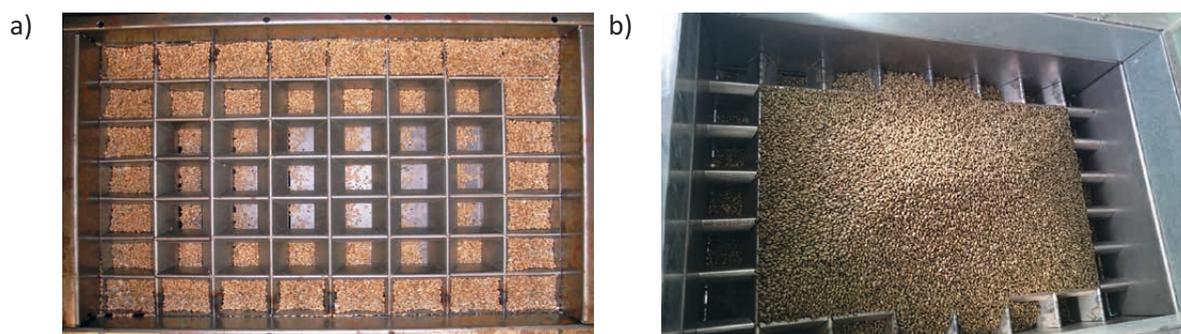


Abbildung 4: Prototyp eines Doppelschieber-Austragsystems:  
a) mit Leitblechen an den Wänden, b) ohne Leitbleche an den Wänden (Fotos: G. Franke)

### Austrageeinrichtung mit Dosierkammern

Eine Alternative zum konventionellen Schlitzbodenaustrag stellt das Schiebersystem mit Dosierkammern dar (Abbildung 5). Hierbei wird der Austragsmassenstrom durch das Kammervolumen und die Anzahl der in beiden Richtungen ausgeführten Hübe eingestellt. Mit jedem Hub entleeren sich die mit Schüttgut gefüllten Kammern unterhalb der dachförmigen Einbauten. Gleichzeitig füllen sich die während des ersten Schrittes noch ungefüllten Kammern. Im Gegensatz zum konventionellen Schlitzbodenaustrag mit Entleerung über die Öffnungszeit des Schiebers wird mithilfe dieses volumetrischen Dosiersystems ein gleichmäßiger Schüttgutabzug aus allen Auslauftrichtern gewährleistet.

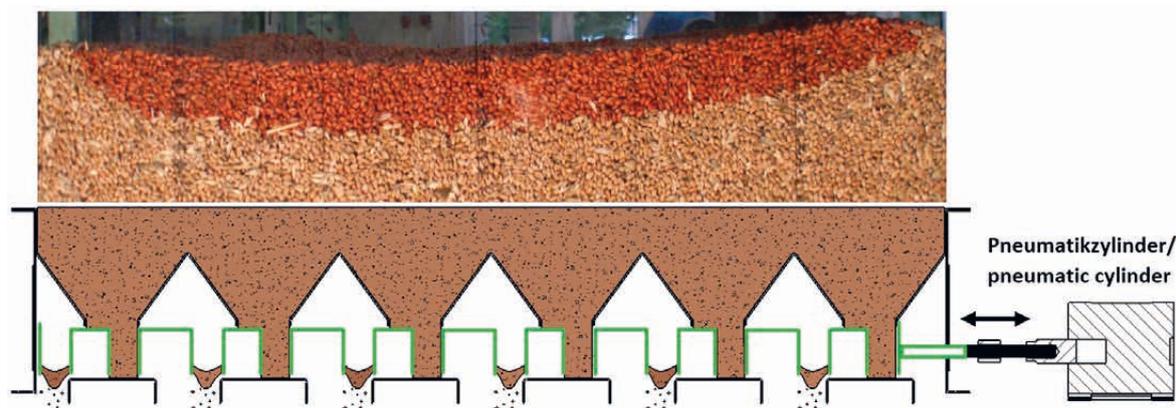


Abbildung 5: Fließprofil einer rot eingefärbten Weizenschüttung nach einigen Austrägen (Foto: G. Franke) oberhalb einer ganzflächigen Austrageinrichtung mit Dosierkammern (Typ NDT, Fa. Neuero)

Zur qualitativen Untersuchung der Schüttgutbewegung in einem Silo oder Behälter eignet sich u. a. auch der Einsatz von Tracer-Partikeln. Hierzu wurde Weizen mit roter Lebensmittelfarbe eingefärbt und als gleichmäßige horizontale Schicht auf das ungefärbte Gut aufgebracht. Mit jedem Austragshub des pneumatischen Zylinders bewegte sich die eingefärbte Schicht weiter in Richtung der Auslauftrichter. Dabei zeigte sich nach nur wenigen Hüben das durch die Wandreibung bestimmte Fließprofil in Rand- und Kernzone.

Möglichkeiten die Schüttgutbewegung lokal zu kontrollieren sind bei dieser Ausführung nur durch Variation der Neigungswinkel und die Dimensionierung einzelner Kammern realisierbar. Geht es um die unabhängige Freigabe einzelner Auslauftrichter, so eignen sich im Hinblick auf die technische Umsetzbarkeit u. a. auch einzeln angesteuerte Pendel und Klappen oder rotierende Zellenrad- und Walzensysteme.

## Schlussfolgerungen

Ernteprodukte werden in unterschiedlichen Silos und Behältern gelagert und z. T. in sehr komplexen Apparaten aufbereitet. Für die Entleerung einfacher Lagerbehälter reicht es oftmals, den gesamten Behälterinhalt in Bewegung zu versetzen, um ihn vollständig zu entleeren. In einigen Prozessen, wie z. B. der Trocknung von landwirtschaftlichen Gütern, wird darüber hinaus noch die Anforderung an eine möglichst homogene Schüttgutbewegung gestellt, um dadurch einheitliche Verweilzeiten und gleiche Trocknungsbedingungen über dem gesamten Apparatequerschnitt zu schaffen. Neben der Apparategestaltung nimmt vor allem die am Boden befindliche, ganzflächig arbeitende Austrageinrichtung einen erheblichen Einfluss auf die Schüttgutbewegung. Mithilfe experimenteller Untersuchungen zur Schüttgutbewegung wurden Zusammenhänge zwischen der Arbeits- und Gestaltungsweise von ganzflächigen Austrageinrichtungen und dem Auslaufverhalten untersucht. Ganzflächige Austrageinrichtungen mit einfachem Schieber kontrollieren den Massenstrom über die Öffnungszeit bei gleichzeitiger Freigabe aller Auslauftrichter. Aufgrund der Wechselwirkung zwischen der Schüttgutbewegung und der Wandreibung kommt es zu einer Verlangsamung der Fließgeschwindigkeit im Wandbereich. Eine Verkleinerung der Neigungswinkel am Rand könnte diesen Effekt kompensieren. Der gänzliche Verzicht der hierbei eingesetzten Leitbleche sorgte beim Test eines Prototyps mit Doppelschiebersystem hingegen für ein unkontrollierbar schnelles Entleeren der Randzone, was diese

Einbauten unverzichtbar macht. Zur besseren Kontrolle der Austragsmenge werden rotierende Walzen, Zellenräder oder Schieber mit Dosierkammern als Verschleißmechanismus eingesetzt. Obgleich die volumetrische Dosierung auch hier einen einheitlichen Schüttgutabzug gewährleistet, kann die gleichzeitige Entleerung das Ausbilden von Fließprofilen im darüberliegenden Apparat nicht verhindern. Am Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie (ATB) wird derzeit eine neue Austrageinrichtung an Lagerbehältern und Durchlauftrocknern getestet. Zukünftig wird untersucht, inwieweit sich ein ungleichmäßiger Trocknungsverlauf in der darüber befindlichen Trocknersäule auch mit einer örtlich angepassten Austragung kompensieren lässt. Auf diese Weise sollen sowohl die Produktqualität als auch die Energieeffizienz des Prozesses gesteigert werden.

## Literatur

- Bohnet, M. (2004): Mechanische Verfahrenstechnik. Wiley-VCH, Weinheim
- Eberle, S. (2013): Austragungssystem für schwer fließende Produkte. *Mühle+Mischfutter* 150(15), S. 464–468
- Franke, G.; Weigler, F.; Teodorov, T.; Mellmann, J. (2015): Austragen über die ganze Fläche. *Schüttgut* 4(21), S. 52–56
- Schulze, D. (2014): Pulver und Schüttgüter. Springer, Heidelberg
- Stieß, M. (2009): Mechanische Verfahrenstechnik 1. 3. Auflage, Springer, Berlin
- Teodorov, T.; Scaar, H.; Weigler, F.; Mellmann, J. (2011): Berechnung des Schüttgutmassenstroms in Dächerschachttrocknern. *Landtechnik* 66(6), S. 410–413, <http://dx.doi.org/10.1515/lt.2011.431>
- Wassermann L.; Mühlbauer W. (1980): Einfluß der Trocknung auf die Qualität von Weizen. *Getreide, Mehl und Brot* 34, S. 225–230
- Wehry, T.; Pahl, M. H. (2005): Beeinflussung des Fließverhaltens von scharfkantigem Schüttgut in Bunkern mit mehreren keilförmigen Auslässen. *Aufbereitungstechnik* 46(10), S. 44–51
- Weigler, F.; Franke, G.; Scaar, H.; Mellmann, J.: (2014): Experimente zum Partikelfluss an einer neu entwickelten Geometrie für Dächerschachttrockner. *Landtechnik* 69(1), S. 30–34, <http://dx.doi.org/10.1515/lt.2014.169>

## Autoren

**Dipl.-Ing. (FH) Georg Franke** ist Doktorand, **Dr.-Ing. Fabian Weigler** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter, **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: [gfranke@atb-potsdam.de](mailto:gfranke@atb-potsdam.de).

**Dr.-Ing. Peter Müller** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

## Danksagungen

Die Autoren danken der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) Berlin für die Förderung des ZIM Kooperationsprojekts „Austrageinrichtung zur Steuerung der Massenstromdichte von Schüttgütern“ (FKZ: KF2050824WZ4).