

# Experimentelle Bestimmung des Entmischungsverlaufes unter Anwendung von Computertomografieverfahren

Konstantin Beckmann, Michael Schwarz, Stefan Böttinger, Ralf Bölling, Ludger Frerichs, Markus Eberhorn

Zur Entwicklung hocheffizienter Mähdrescherreinigungsanlagen werden heute in zunehmendem Maße Modellierungsverfahren wie DEM und CFD eingesetzt. Dazu ist es notwendig, die komplexen verfahrenstechnischen Prozesse der Entmischung und Abscheidung in der Mähdrescherreinigungsanlage messtechnisch zu verifizieren. Eine Möglichkeit ist die Bestimmung der Entmischungs- und Abscheidefunktion mithilfe der 3D-Röntgen-Computertomografie. Die Methode erlaubt die Visualisierung und Analyse des Bewegungsverhaltens der Gutbestandteile während des Entmischungs- und Abscheideprozesses sowie die Ableitung beschreibender Prozessparameter. Dazu wurde ein mechanisch angeregter Miniaturprüfstand konzipiert und konstruiert. Durch die Auswertung der aufgenommenen Röntgenbilder konnte der Entmischungsprozess visuell beschrieben werden. Eine detailliertere Analyse ermöglichte eine Entwicklung der Entmischungs- und Abscheidefunktion anhand der unterschiedlichen Dichten von Korn und Nichtkornbestandteilen.

## Schlüsselwörter

Reinigungsanlage, Mähdrescher, Computertomografie, Entmischung, Abscheidung

In der Mähdrescherverfahrenstechnik hat sich die Simulation zu einem unverzichtbaren Analysewerkzeug entwickelt. Sie ermöglicht Funktionsentwicklungen zeit- und somit kosteneffizienter zu gestalten. Häufig setzen sich diese Simulationen aus verschiedenen komplexen numerischen Verfahren zusammen. Einen Einblick in diese Verfahren sowie einen Überblick über die Anwendungsgebiete der Simulation in der Landtechnik geben KORN und HERLITZIUS (2014). Eine Validierung dieser Simulationsmodelle erfolgt häufig mithilfe vereinfachter Prüfstände, um die verfahrenstechnische Komplexität der Prozesse zu reduzieren (PFÖRTNER und BÖTTINGER 2013, PFÖRTNER et al. 2014). Eine Validierung von Modellierungsansätzen zur Simulation der Entmischung und Abscheidung in einer Mähdrescherreinigungsanlage ist aufgrund der komplexen messtechnischen Aufnahme der Prozesse schwierig. Die Auswirkungen der verschiedenen Einflussparameter wie Schwingungsamplitude etc. auf die Entmischung wurde hinreichend untersucht (FREYE 1980, ROCHELL 1975, TIMOFEEV 2013, ZEHME 1972, BÖTTINGER und TIMOFEEV 2010). Der Entmischungs- und Abscheideprozess wird in der Regel mit der Durchdringungszeit beschrieben (BECK 1992). Hierbei werden die aufgegebenen und die abgeschiedenen Körner berücksichtigt. Eine Betrachtung der Bewegung der Körner in der Gutschicht während der Entmischung ist hierbei nicht möglich. Informationen über das detaillierte Bewegungsverhalten von Korn und Nichtkornbestandteilen (NKB) beim Entmischungsprozess stehen aufgrund der bisher verfügbaren Messtechnik somit nicht zur Verfügung. Mittels fotografischer

Messverfahren kann das Bewegungsverhalten der Gutgemischbestandteile in wandnahen Bereichen ermittelt werden (WEIS et al. 2013). Allerdings sind diese aufgrund der fehlenden dritten Dimension nur eingeschränkt nutzbar. Mit der Kenntnis des dreidimensionalen Bewegungsverhaltens kann der Entmischungsprozess detailliert beschrieben und der Zusammenhang zu den Stoffdaten der Gutgemischbestandteile (Reibung, Elastizitäten etc.) belegt werden. Daher würde dieses Wissen die Modellierbarkeit der Vorgänge mittels DEM- und CFD-Simulationen verbessern und eine Validierung ermöglichen. Im Folgenden werden Untersuchungen vorgestellt, in denen das Bewegungsverhalten der Körner in einer Gutschicht mittels 3D-Röntgen-Computertomografie (CT) aus Korn und Nichtkornbestandteilen berührungslos analysiert wird.

### Theoretische Vorbetrachtung

Zum besseren Verständnis des Entmischungsprozesses soll das Bewegungsverhalten der Körner in einem Korn-NKB-Gemisch während der Entmischung messtechnisch erfasst werden. Dabei wird mithilfe einer zeitabhängigen Positionserfassung jedes Einzelkorns der Weg im Gemisch nachvollzogen und aus diesen Daten die Entmischungs- und Abscheidefunktion berechnet. Eine Möglichkeit zur berührungsfreien Detektion des Bewegungsverhaltens aller im Gutgemisch befindlichen Körner bietet die CT. Mit Aufnahmen im Mikrometer-Bereich sind ausreichend genaue Messungen durchführbar. Das Messprinzip beruht auf der Nutzung von Röntgenstrahlung (Abbildung 1).

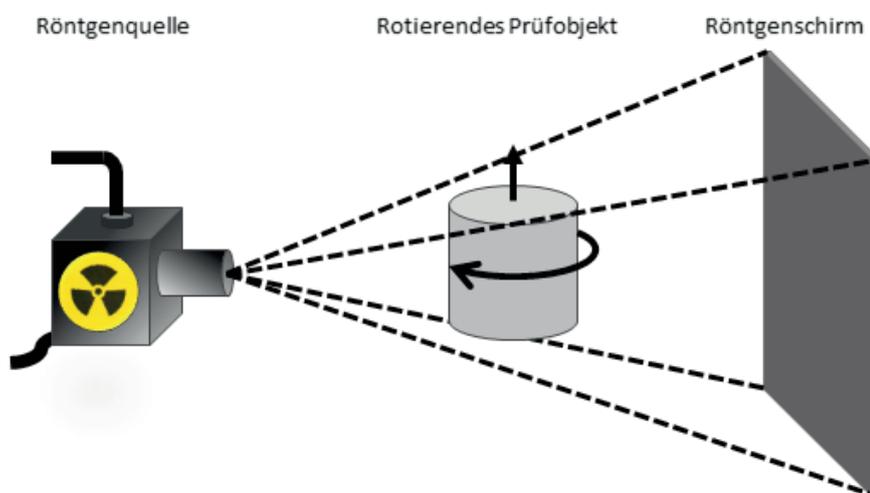


Abbildung 1: Aufbau einer industriellen Computertomografie

Die in der Röntgenquelle erzeugten Strahlen werden in Richtung der auf dem Probenteller befindlichen Probe abgestrahlt. Die Absorption der Röntgenstrahlung ist u. a. von der Dichte der Probe abhängig. Die unterschiedlich stark transmittierte Strahlung trifft anschließend auf den Röntgenschirm. Hier wird aufgrund der Strahlungsintensität ein digitales 2D-Röntgenbild erzeugt. Mit der Drehung der Probe während der Messung werden Röntgenbilder aus unterschiedlichen Richtungen erzeugt. Aus diesem Bilderstapel werden anschließend dreidimensionale Aufnahmen rekonstruiert. Dazu werden Röntgenbilder verwendet, die während einer halben Drehung der Probe aufgenommen wurden. Die industrielle Computertomografie wird hauptsächlich für statische Untersuchungen angewendet, da die Aufnahme und Verarbeitung der Röntgenbilder aufgrund der zu geringen Datenübertragungs-

rate der Röntgendetektoren zwischen 2 und 10 Minuten dauert. Der aktuelle Forschungsschwerpunkt in der industriellen Computertomografie liegt jedoch in der Abbildung dynamischer Vorgänge. So entwickelt das Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltung IIS ein zeitaufgelöstes, dynamisches Computertomografie-Verfahren, in dem der Röntgendetektor durch ein Hochgeschwindigkeitsröntgenkamera-System ersetzt wird. Dieses erlaubt zeitliche Auflösungen von bis zu 2.000 Röntgenbildern pro Sekunde. Die Probe rotiert dabei mit 0,35 1/s. Mit der zeitaufgelösten Computertomografie ist es möglich, dynamische Prozesse im Inneren von Objekten zu visualisieren und zu analysieren. Wie bei der statischen Computertomografie werden dabei die Strukturen der Probe vollständig berührungslos und zerstörungsfrei aufgezeichnet. Die maximal zu untersuchende Objektgröße ist aufgrund der Abmessungen des Röntgendetektors bzw. des Hochgeschwindigkeitsröntgenkamera-Systems begrenzt. Um den Entmischungsvorgang mithilfe der dynamischen Computertomografie abbilden zu können, wurde bei der Fa. CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH ein mechanisch angeregter Miniaturprüfstand entwickelt. Dieser realisiert die Anregung des Gutgemisches durch eine vertikale Oszillation und besitzt eine Geometrie, die den Einsatz im Computertomografen erlaubt. Die Voraussetzung zur Rekonstruktion von 3D-Bildern während der Entmischung und Abscheidung ist, dass zu jedem Zeitpunkt Röntgenbilder, die während einer 180°-Drehung der Probe erstellt wurden, vorliegen. Aufgrund der dynamischen Verhältnisse der Prozesse war zu Untersuchungsbeginn nicht klar, ob die einzusetzende Messtechnik die Rekonstruktion erlaubt. Deshalb erfolgte zusätzlich eine Auswertung anhand der 2D-Röntgenbilder.

### Miniaturprüfstand zur Erzeugung einer vertikalen Oszillation und Versuchsaufbau

Für einen möglichst leichten Aufbau wird ein zylinderförmiger Probenbehälter aus Acrylglas gefertigt. Der Innendurchmesser des Zylinders beträgt 240 mm. Um nicht nur die Entmischung, sondern gleichzeitig auch das Bewegungsverhalten der Körner im Prozess des Siebklassierens untersuchen zu können, wird ein Sieb in den Zylinder eingesetzt (Abbildung 2). Dabei ist die Größe der Siebmaschen so gewählt, dass Korn und kleine NKB-Teile das Sieb passieren können.



Abbildung 2: Probenbehälter

Aufgrund der Rotation der Probe ist die notwendige stationäre Stromversorgung batteriebetrieben. Da die Röntgenstrahlung als ionisierende Strahlung ab einer entsprechenden Dosis gesundheitsgefährdend ist, stehen alle Computertomografen in einer strahlungsundurchlässigen Versuchskammer,

die während des Versuches nicht betreten werden darf. Die vom Miniaturprüfstand erzeugte Oszillation ist mittels Fernbedienung zu- und abschaltbar. Eine CAD-Zeichnung und ein kinematisches Schema veranschaulichen die Erzeugung der Oszillation (Abbildung 3).

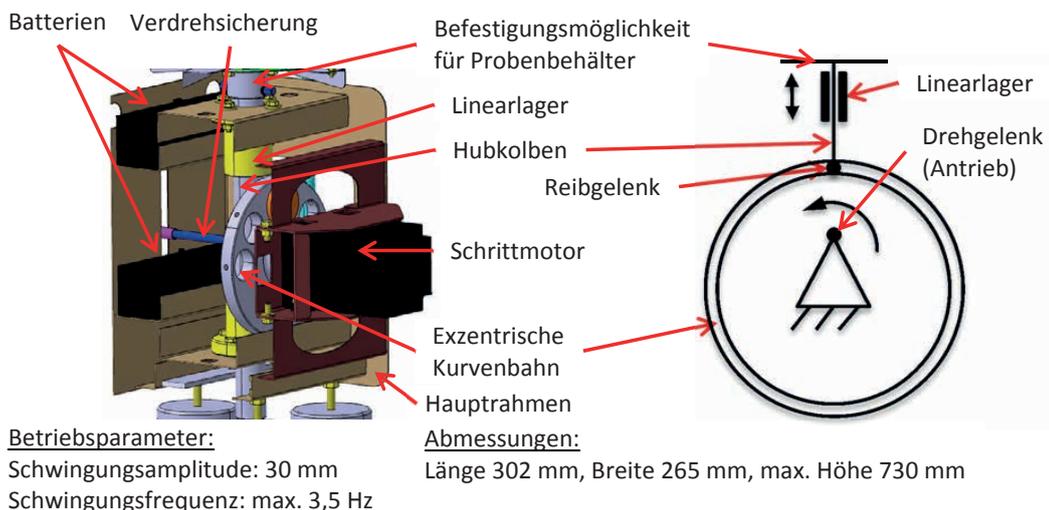


Abbildung 3: Miniaturprüfstand zur Erzeugung einer vertikalen Oszillation

Über einen Kurventrieb wird die rotatorische Bewegung des Schrittmotors, der wegen der einfachen Bedienung verwendet wurde, in eine angenäherte sinusförmige Hubschwingung umgewandelt. Die Drehzahl kann von 0 bis 3,5 1/s stufenlos verstellt werden. Die Kurvenbahn erlaubt eine feste Amplitude der Hubschwingung von 30 mm. Die mechanische Anregung ist über die Drehzahl einstellbar. Auf dem Hubkolben wird der Probenbehälter fixiert. Der Miniaturprüfstand ist so konstruiert, dass er direkt auf dem rotierenden Probenteller installiert werden kann (Abbildung 4). Zur Aufnahme der Röntgenbilder wurden die Spannung der Röntgenröhre auf 90 kV und der dazugehörige Elektronenstrom auf 12 mA eingestellt. Die Belichtungszeit der Kamera beträgt 500  $\mu$ s.

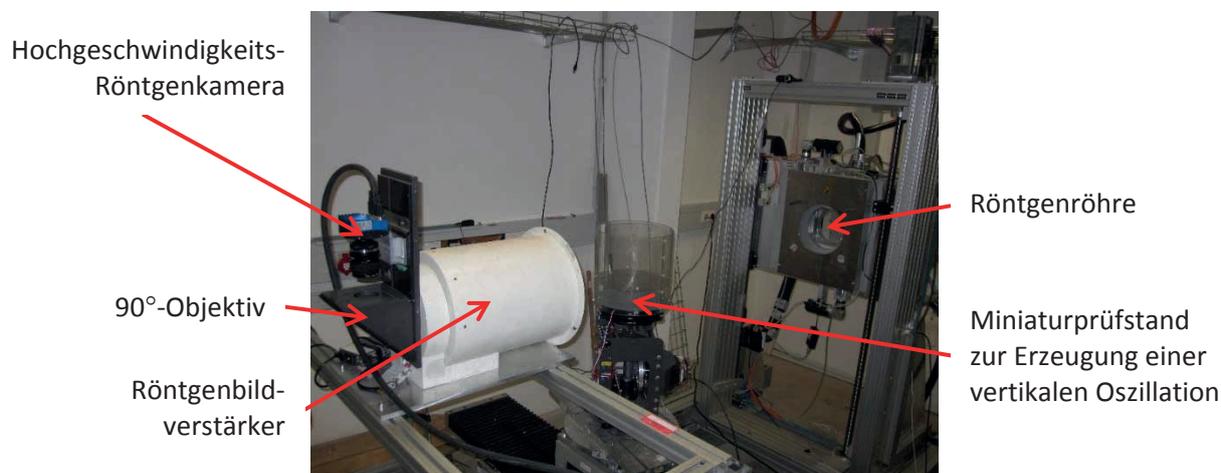


Abbildung 4: In den Computertomografen installierter Miniaturprüfstand

Bei der Darstellung der 3D-Bilder mithilfe der Software myVGL (Volume Graphics) ist eine beliebige Grenzdichte einstellbar. Alle Partikel, die eine höhere Dichte als die Grenzdichte aufweisen, werden dementsprechend dargestellt. In Abbildung 5 ist die Grenzdichte so eingestellt, dass nur das Korn abgebildet wird. In Abbildung 6 sind aufgrund der niedrigeren Grenzdichte ebenfalls NKB zu erkennen. Mit einer Auflösung von 200  $\mu\text{m}$  werden auch die Strukturen der NKB detailliert dargestellt. Des Weiteren kann die Aufnahme an einer beliebigen Ebene geschnitten werden. So sind nicht nur die Körner an der Oberfläche, sondern auch im Inneren des Haufwerks analysierbar.



Abbildung 5: Mithilfe der Computertomografie erstelltes 3D-Bild eines Korn-NKB-Gemisches; nur Körner dargestellt



Abbildung 6: Mithilfe der Computertomografie erstelltes 3D-Bild eines Korn-NKB-Gemisches; Darstellung von Korn und NKB

### Versuchsdurchführung

Zu Versuchsbeginn wird der Probenbehälter mit einer Schichtung Korn auf NKB befüllt. Die Schichthöhe NKB beträgt dabei vor Aufgabe des Kornes  $h_{\text{NKB}} = 46$  mm. Bei Aufgabe des Kornes mit einer idealisierten Schichthöhe von  $h_{\text{Korn}} = 9$  mm wird die NKB-Schicht gestaucht. Durch die vertikale Hubschwingung wird erwartet, dass das auf dem NKB aufliegende Korn im Rahmen eines Entmischungsprozesses durch die NKB-Schicht zum Sieb wandert und dort in einem Siebprozess abgeschieden wird. Zur Analyse dieser Prozesse wird die Frequenz so eingestellt, dass eine Froude-Zahl  $F_{\text{RV}} = 1$  erreicht wird. Die Froude-Zahl  $F_{\text{RV}}$  setzt die Beschleunigung, die das Korn aufgrund der Oszillation erfährt, ins Verhältnis zur Erdbeschleunigung. Bei  $F_{\text{RV}} = 1$  geht das Korn-NKB-Gemisch auf dem Sieb gerade in eine Wurfphase über. Die Dauer der CT-Aufnahme beträgt 6,6 Sekunden. Dabei wurden 6.550 Röntgenbilder erstellt, die zur Rekonstruktion verschiedener 3D-Bilder zur Verfügung stehen. Auf eine längere Aufnahme des Entmischungsprozesses wurde aufgrund der großen Datenmengen verzichtet.

### Ergebnisse

3D-Bilder können nur von quasistatischen Vorgängen erstellt werden, die nicht durch die Umdrehung des Proben Tellers beeinflusst sind. Deshalb wird im Folgenden auf die Auswertung der zweidimensionalen Röntgenbilder eingegangen (Abbildung 7). Diese Bilder geben nicht die Seitenansicht auf den Probenbehälter, sondern die Aufsummierung über die gesamte Tiefe des Behälters wieder.

Das Sieb ist aufgrund der hohen Dichte sehr dunkel dargestellt. Die dunkel dargestellten Weizenkörner liegen auf dem heller dargestellten NKB. Durch eine Aneinanderreihung der Bilder wurde ein Film erstellt, der den Entmischungs- und Abscheideprozess zeigt. Die Körner wandern wie angenommen während der Anregung mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durch die NKB-Schicht und treffen anschließend auf das Sieb und werden abgeschieden.

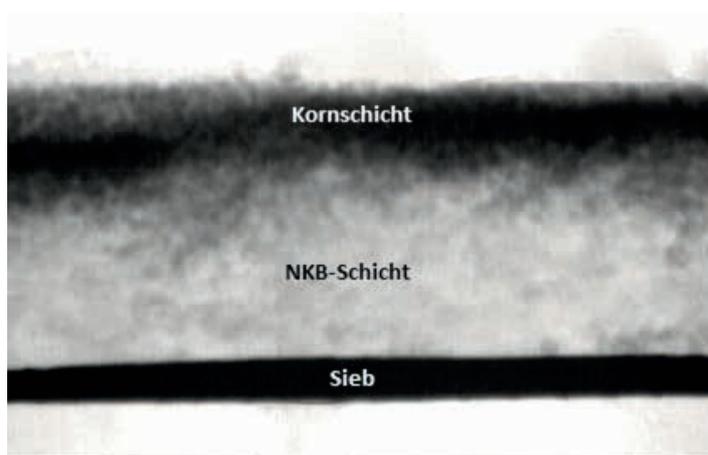


Abbildung 7: Röntgenbild des geschichteten Versuchsgutes (Korn auf NKB) zu Beginn der Messung

Um genauere Informationen über die Entmischung zu erhalten, wird der obere Abstand der Kornschicht vom Siebboden und die Kornschichthöhe im unteren Totpunkt der vertikalen Hubschwingung mit der „Image Acquisition“ und der „Image Processing Toolbox“ von der Software Matlab ermittelt. Das Ziel ist, eine Aussage sowohl über die Sinkgeschwindigkeit der Körner als auch über die Varianz der Sinkgeschwindigkeit treffen zu können, indem die Schichthöhe des Kornes in Abhängigkeit von der Zeit ermittelt wird. Es erfolgt eine Umwandlung der Röntgenbilder in binäre (schwarz-weiße) Bilder (Abbildung 8).

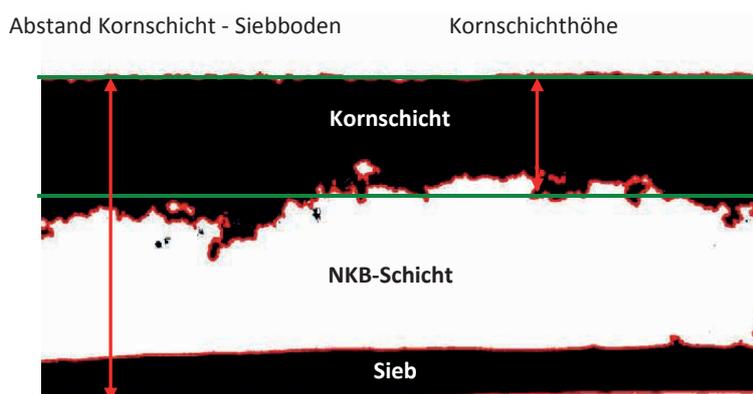


Abbildung 8: Binäres Bild eines Korn-NKB-Gemisches

Der Kontrast wird so gewählt, dass die Kornschicht sowie das Sieb sichtbar sind (schwarz dargestellt) und ein Algorithmus die Kornschichthöhe sowie den Abstand zwischen Kornschicht und Siebboden bestimmen kann. Die Grenzschicht, die den Übergang der Kornschicht zur NKB-Schicht definiert, ist so gewählt, dass die Hälfte der Pixel in dieser Zeile weiß (NKB) sein muss. Als Markierung

für das Sieb wird der untere Teil des Siebbodens gewählt, da der Siebboden vom Algorithmus besser identifiziert werden kann und die Siebdicke im Gegensatz zur Schichthöhe der Gutschicht sehr klein ist. Die Position von Röntgenröhre und Hochgeschwindigkeitsröntgenkamera ist horizontal zur Mitte des Probenkörpers. Deshalb wird das tiefer liegende Sieb etwas schräg von oben aufgenommen. Dadurch erscheint das Sieb in den Bildern dicker.

Die Kornschichthöhe (Abbildung 9) steigt während des Entmischungsvorganges, da die Körner nicht gleichmäßig durch die NKB-Schicht sinken. Dadurch zieht sich die Kornschicht auseinander. Zum Ende des Versuches ist die Mehrzahl der Körner durch die NKB-Schicht zum Siebboden gesunken, die Schichthöhe des Korn wird geringer. Der Abstand der Kornschicht zum Siebboden über der Zeit beschreibt einen linearen Verlauf (Abbildung 10). Dieser Verlauf indiziert einen gemittelten Korndurchgang durch die NKB-Schicht. Die mittlere Sinkgeschwindigkeit wird durch die Steigung der Geraden abgebildet. Zu beachten ist, dass die Körner bei dieser Auswertung immer zusammen betrachtet werden. Eine Auswertung einzelner Körner ist aufgrund der nicht bestimmbaren Bewegungskordinaten für jedes Korn nicht möglich.

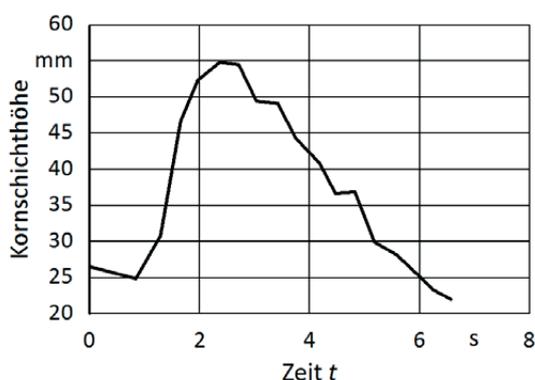


Abbildung 9: Aus Röntgenbildern ermittelte Kornschichthöhe in einem Korn-NKB-Gemisch während eines Entmischungsprozesses

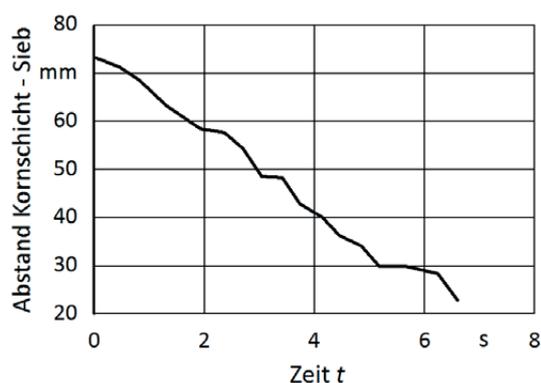


Abbildung 10: Aus Röntgenbildern ermittelter Abstand von Kornschicht zu Siebboden in einem Korn-NKB-Gemisch während eines Entmischungsprozesses

## Schlussfolgerungen

Mit Highspeed-Röntgenaufnahmen kann das Entmischungs- und Abscheideverhalten von Körnern in einem Korn-NKB-Gemisch detaillierter analysiert werden. Während übliche Kameras nur die Randschicht darstellen, ist mit den Röntgenaufnahmen eine Berücksichtigung der Tiefe des Probenkörpers möglich. Mit der Röntgen-CT-Technik können von quasistatischen Vorgängen 3D-Bilder erzeugt und innerhalb des Probenkörpers die Lage einzelner Partikel analysiert werden. Die nötige schnelle Rotation des Probenkörpers bei der Aufnahme beeinflusst die Dynamik des Entmischungsprozesses.

Auf Basis der erstellten Röntgenbilder ist eine Darstellung der Kornschichthöhe und des Abstandes der Kornschicht zum Sieb möglich. Im Gegensatz zu weiteren Verfahren zur Bestimmung der Entmischungs- und Abscheidefunktion werden dabei nicht nur die Anfangsbedingungen und der zeitliche Verlauf der abgeschiedenen Kornmasse betrachtet, sondern das durchschnittliche Bewegungsverhalten der Körner während der Entmischung visualisiert und untersucht. Zusätzlich werden diese Daten zur Validierung von DEM- und CFD-Simulationen verwendet, da das durchschnittliche Bewegungsverhalten der Körner im gesamten Volumen sichtbar ist und Reibungseffekte an der Wand ausgeblendet werden.

## Literatur

- Beck, T. (1992): Messverfahren zur Beurteilung des Stoffeigenschaftseinflusses auf die Leistung der Trennprozesse im Mähdrescher. Dissertation Universität Stuttgart, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 14: Landtechnik/Lebensmitteltechnik Nr. 54
- Böttinger, S.; Timofeev, A. (2010): Fördervorgang und Vorentmischung auf dem Vorbereitungsboden von Mähdreschern. Landtechnik 65(5), S. 380–382, <http://dx.doi.org/10.15150/lt.2010.520>
- Freye, T. (1980): Untersuchungen zur Trennung von Korn-Spreu-Gemischen durch die Reinigungsanlage des Mähdreschers. Dissertation Universität Hohenheim, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der MEG Nr. 47, Hohenheim
- Korn, C.; Herlitzius, T. (2014): Strömungssimulation als Entwicklungswerkzeug in der Mähdruschtechnik – Potenzial, numerische Verfahren und Validierung. In: Tagung LAND.TECHNIK 2014, VDI-MEG, 19.–20.11.2014, Berlin, VDI-Verlag, S. 65–73
- Pförtner, J.; Böttinger, S. (2013): Validierungsstrategie für DEM-Modelle von Mähdrescherbaugruppen. In: Kolloquium Landtechnik Mähdrescher 2013, VDI-MEG, 12.–13.09.2013, Hohenheim, S. 27–32
- Pförtner, J.; Böttinger, S.; Schwarz, M.; Bölling, R. (2014): Methode zur Modellierung und Verifizierung strömungstechnischer Eigenschaften von Korn- und Strohpartikeln. In: Tagung LAND.TECHNIK 2014, VDI-MEG, 19.–20.11.2014, Berlin, VDI-Verlag, S. 325–332
- Rochell, P. (1975): Untersuchungen über den Fördervorgang auf dem Schwingförderer unter besonderer Berücksichtigung der Reinigungsanlage im Mähdrescher. Dissertation Universität Hohenheim, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der MEG Nr. 4
- Timofeev, A. (2013): Förderung und Entmischung auf dem Vorbereitungsboden des Mähdreschers. Dissertation Universität Hohenheim, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der MEG Nr. 527, Aachen, Shaker Verlag 2013
- Weis, M.; Schwarz, M.; Böttinger, S. (2013): Analyse der Gutentmischung auf dem Vorbereitungsboden. In: 19. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft, Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim, 6.–7.5.2013, Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 81, S. 170–178
- Zehme, C. (1972): Beitrag zur Klärung der Kornabscheidung aus einem homogenen Korn-Stroh-Spreu-Gemisch mit Hilfe eines luftdurchströmten, in seiner Ebene schwingenden horizontalen Plansiebtes, dargestellt am Beispiel der Gutart Weizen. Dissertation Technische Universität Dresden

## Autoren

**M. Sc. Konstantin Beckmann** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und **Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttinger** ist Leiter des Fachgebiets Grundlagen der Agrartechnik der Universität Hohenheim, Garbenstr. 9, 70599 Stuttgart, E-Mail: [Konstantin.Beckmann@uni-hohenheim.de](mailto:Konstantin.Beckmann@uni-hohenheim.de).

**Dipl.-Ing. IWE Michael Schwarz** und **Dr.-Ing. Ralf Bölling** sind Entwicklungsingenieure bei CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH Harsewinkel

**Prof. Dr. Ludger Frerichs** ist Leiter des Instituts für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der Technischen Universität Braunschweig

**Dipl.-Ing. Markus Eberhorn** ist Gruppenleiter für Computertomographiesysteme in der Abteilung Prozessintegrierte Prüfung, Fraunhofer Entwicklungszentrum Röntgentechnik EZRT, ein Bereich des Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS in Kooperation mit Fraunhofer IZFP.

## Danksagungen

Das Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim dankt dem Projektpartner CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH Harsewinkel, Abteilung Vorentwicklung-Funktionstechnik, für die Unterstützung in der Fertigung und Finanzierung der Anlage.

Das Institut für Agrartechnik der Hohenheim dankt dem Fraunhofer IIS für die Unterstützung bei der Durchführung der Versuche.