

Gekoppelte CFD-DEM-Simulation des Trennprozesses in Mähdrescherreinigungsanlagen

Christian Korn, Thomas Herlitzius

Der vorliegende Artikel befasst sich mit der Anwendung der gekoppelten CFD-DEM-Methode (CFD – Computational Fluid Dynamics; DEM – Discrete Element Method) zur Simulation des Trennprozesses von Korn und NKB (Nichtkornbestandteile) in der Reinigungsanlage des Mähdreschers. Die Vielzahl der Einflussfaktoren, deren Wechselwirkungen, die breite Streuung von Eigenschaften, welche für biogene Partikel typisch sind, und die daraus resultierende Komplexität des Trennprozesses erfordern einen strategischen Ansatz zur Erstellung eines validen Simulationsmodells. Die in diesem Artikel vorgestellte Studie untersucht den Trennprozess daher auf zwei Ebenen, welche sich durch den Grad der Prozessabstraktion unterscheiden. Durch den Vergleich der numerischen Ergebnisse mit entsprechenden experimentell gewonnenen Ergebnissen wird die Anwendbarkeit des numerischen Verfahrens bestätigt. Es können jedoch auch Abweichungen identifiziert werden, die die Notwendigkeit weiterer Forschung zur Verbesserung der Parametrierung und Modellierung unterstreichen.

Schlüsselwörter

CFD, DEM, Numerische Simulation, Mähdrescherreinigungsanlage, Trennprozess von Korn und Nichtkornbestandteilen

Der Mähdrescher ist die zentrale Maschine in der Getreideproduktion. Es werden die Prozesse Schneiden, Dreschen, Vorentmischen, Entmischen/Trennen, Zerkleinern und Verteilen des Erntegutes in einer mobilen Arbeitsmaschine vereint. Die Reinigungsanlage entmischt und trennt die von den Drusch- und Abscheideorganen zugeführte Mischung unter Verwendung eines Sieb-Sicht-Prozesses in die Klassen Korn (Reinigungsdurchgang) und die Nichtkornbestandteile (kurz: NKB; Reinigungsübergang), die im Wesentlichen aus Spreu und Kurzstroh bestehen.

Die Beladung der Reinigungsanlage hat in den letzten Jahren stetig zugenommen. Der Grund hierfür liegt zum einen in der allgemeinen Steigerung des Gutdurchsatzes und zum anderen in der verstärkten Produktion von Kurzstroh durch den Einsatz von rotierenden Abscheideelementen bei Mähdreschern der oberen Leistungsklasse (RADEMACHER 2011, ZHAO 2002, HÜBNER 1999, F. BECK 1999). Gegenwärtig stellt die Reinigungsanlage sehr oft das durchsatzbegrenzende Element dar (DAHANY 1994). Durch ein inakzeptables Kornverlustniveau der Reinigungsanlage kann die installierte Motorleistung des Mähdreschers häufig nicht voll ausgeschöpft werden.

Aktuell werden Arbeiten zur Entwicklung oder Optimierung von Reinigungsanlagen vorwiegend empirisch auf experimenteller Basis durchgeführt, was nicht effizient ist. Solche Tests sind zeitaufwendig, teuer, schwer reproduzierbar und ermöglichen nur selten einen tieferen Prozesseinblick. Die Charakterisierung der Teilchenbewegung durch Messungen ist nur mit unverhältnismäßigem Aufwand in der notwendigen Genauigkeit realisierbar. Aufgrund der rauen Bedingungen in der Reinigungsanlage

durch Staub und hohe Partikelkonzentration ist die Anwendbarkeit von Strömungsmesstechnik stark eingeschränkt. Darüber hinaus ist der Trennprozess abhängig von einer großen Anzahl an Einflussfaktoren, wobei die Zusammenhänge bis heute nicht vollständig geklärt sind (BECK 1992). Die experimentelle Maschinenentwicklung auf der Basis von Feldtests ist durch die kurze Erntezeit nur eingeschränkt möglich. Labortests sind zwar während des ganzen Jahres möglich, die Aussagekraft und die Vergleichbarkeit mit Feldtests sind jedoch begrenzt.

In den letzten Jahrzehnten wurden numerische Verfahren zur Simulation von dispersen Mehrphasenströmungen zu leistungsfähigen Werkzeugen weiterentwickelt (ZHU et al. 2008, LU et al. 2015). Es gibt eine Vielzahl verschiedener Verfahren, die aufgrund ihrer Eigenschaften, ihres numerischen Aufwands und ihres Informationsgewinns bzw. ihres Detailgrads in verschiedenen Anwendungsbereichen etabliert sind. Zu diesen gehören die Two Fluid Models (TFM), die Particle Tracking Models (PTM), die Discrete Particle Models (DPM), die Volume of Fluid Models (VOF), die Lattice Boltzmann Models (LBM) und die Immersed Boundary Models (IBM). Weiterhin unterscheiden sich diese Ansätze durch die Art der Betrachtungsweise (Euler oder Lagrange), die Auflösung der Phasengrenze (aufgelöst oder nicht aufgelöst) und die Kopplung zwischen den Phasen. Darüber hinaus hat die Auflösung von Längen- und Zeitskalen einen großen Einfluss auf den Rechenaufwand. Mithilfe einer validen numerischen Methode zur Simulation des Trennprozesses von Korn und NKB könnten zukünftig Experimente teilweise ersetzt, oder aber zum besseren Prozessverständnis durch entsprechende Simulationen ergänzt werden. Hierdurch wird es möglich Entwicklungskosten zu senken, Zeit zu sparen und reproduzierbare Ergebnisse unabhängig von der Erntesaison zu erzielen. Im Vergleich zu Experimenten bieten Simulationen bessere Möglichkeiten, das Strömungsfeld zu visualisieren und die Bewegung der Teilchen zu verfolgen. Aufgrund der Parallelisierbarkeit von Simulationen ist ein Zeitvorteil gegenüber Experimenten möglich, sofern die benötigte Rechenkapazität verfügbar ist.

Biogene Partikel, z. B. Getreide oder Leguminosen, wie sie in der Mähreschereinigungsanlage verarbeitet werden, weisen – abhängig von der Herkunft des Materials und den spezifischen Erntebedingungen – komplexe physikalische Eigenschaften und eine große Variabilität auf. In den meisten Fällen sind diese Partikel nicht sphärisch. Insbesondere die Strohpartikel können ein Länge-Durchmesser-Verhältnis von mehr als 100 aufweisen. Des Weiteren kann ein biogenes Partikel an verschiedenen Positionen seines Volumens aus verschiedenen Materialien bestehen, was eine einheitliche Modellierung und Parametrisierung erschwert. Eine weitere Besonderheit biogener Partikel ist die Möglichkeit Wasser zu absorbieren, was zu einer Veränderung der physikalischen Eigenschaften und damit des Kontaktverhaltens führt. Es ist aus der Literatur und aus der praktischen Erfahrung bekannt, dass sowohl die mittlere Partikelfeuchte als auch die Oberflächenfeuchte den Trennprozess signifikant beeinflussen (FREYE 1980). Daher ist es notwendig, die Wirkung der Feuchte in der Simulation zu berücksichtigen.

Gegenwärtige Simulationsverfahren für Mehrphasenströmungen können die oben erwähnten Eigenschaften biogener Partikel nicht berücksichtigen und sind daher nicht in der Lage, unmittelbar zuverlässige Ergebnisse bereitzustellen. Die in kommerziellen Codes verfügbaren Modelle für Partikelkontakt oder Wechselwirkung mit dem umgebenden Fluid sind überwiegend aus den Gebieten der Verfahrenstechnik abgeleitet. Die Eigenschaften biogener Partikel (z. B. Sphärizität) liegen jedoch zum Teil außerhalb der Modellgrenzen der implementierten Modelle, weshalb ihre Anwendung hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse überprüft werden muss.

Trotz aller oben beschriebenen Herausforderungen werden numerische Verfahren seit einiger Zeit erfolgreich auf funktionelle Prozesse in der Getreideerntetechnologie und insbesondere auf Trenn-

prozesse angewendet. SCHWARZ et al. (2012) verwenden den DEM-Code PASIMODO um die Teilchenbewegung auf dem Vorbereitungsboden des Mähreschers zu berechnen. Der Trennprozess von Korn und Langstroh auf den Hordenschüttlern konventioneller Mährescher steht im Mittelpunkt der numerischen Untersuchungen von LENAERTS et al. (2014). PFÖRTNER und BÖTTINGER (2013) veröffentlichen numerische und experimentelle Ergebnisse der Trennung von Korn und Kurzstroh in einem vertikal schwingenden Behälter mit Kugelverbundpartikeln in einer reinen DEM-Umgebung. In einer späteren Publikation prägen PFÖRTNER et al. (2016) ein konstantes Strömungsfeld auf die Domäne auf, welches mithilfe von CFD berechnet wurde. MA et al. (2015) simulieren die Entmischung von Reiskörnern und Strohpartikeln in einer vereinfachten Reinigungsanlage in der EDEM-Softwareumgebung, wobei die Schwingungsamplitude variiert wird. LI et al. (2012) verwenden einen gekoppelten CFD-DEM-Ansatz (EDEM von DEM-Solutions und FLUENT von ANSYS), um die Trennung von Reiskörnern und Strohpartikeln in der Reinigungsanlage eines Reismähreschers zu simulieren. Andere Autoren konzentrieren sich auf die Parametrisierung von DEM-Partikeln (PRÜFER et al. 2014). Das Ziel besteht darin, eine belastbare Datenbank an Partikeleigenschaften für eine Vielzahl landwirtschaftlicher Stoffe bereit zu stellen, welche mit standardisierten oder auf eine spezifische Problemstellung zugeschnittenen Experimenten gewonnen werden. Zusammenfassend kann jedoch festgestellt werden, dass der Einfluss der Feuchte, streuende Partikeleigenschaften und weitere spezifische Merkmale von biogenen Partikeln in den bislang veröffentlichten numerischen Untersuchungen von Trennprozessen nicht berücksichtigt oder überprüft wurden.

Ziele

Die Professur für Agrarsystemtechnik (AST) der Technischen Universität Dresden (TUD) beschäftigt sich seit mehreren Jahren mit der Simulation von Materialtransport, -bearbeitung und -trennung in den Funktionselementen von Erntemaschinen. Das übergeordnete Ziel der Forschung ist die Entwicklung von belastbaren und effizienten numerischen Modellen für ihre Anwendung im CAE-Umfeld, um die Prozessoptimierung und funktionale Entwicklung zu beschleunigen. In diesem Artikel liegt der Fokus auf dem Trennprozess in der Mährescherreinigungsanlage; die spezifischen Ziele sind:

- Identifikation von signifikanten Parametern und deren Einfluss auf die Simulationsergebnisse
- Berücksichtigung charakteristischer Eigenschaften biogener Partikel und Bewertung ihrer Wirkung auf die Simulationsergebnisse
- Modellierung der mittleren Partikelfeuchte als Einflussfaktor auf den Trennprozess
- Ermittlung von maßgeblichen Faktoren für den numerischen Aufwand und von Möglichkeiten, diesen zu reduzieren
- Abschätzung der Genauigkeit des Simulationsmodells durch den Vergleich mit experimentell gewonnenen Daten
- Erfassung der Ursachen von Abweichungen und Unsicherheiten und darauf basierend, die Ableitung des weiteren Forschungsbedarfs

Dieser Artikel spiegelt einen kurzen Auszug der Ergebnisse wider, welche bisher im Rahmen des oben genannten Forschungsprojektes erzielt wurden.

Numerisches Simulationswerkzeug

In einer früheren Veröffentlichung wurde die Methodik zur Auswahl eines geeigneten Simulationswerkzeugs bereits beschrieben (KORN 2014). Im Hinblick auf die notwendige Zwei-Wege-Kopplung, die verfügbaren Rechenressourcen und die Forderung nach Verfolgbarkeit einzelner Partikel zur Bestimmung von Kornverlust und Reinheit ist allein der gekoppelte CFD-DEM-Ansatz in der Lage, diese Anforderungen erfüllen.

Die Software „Star-CCM + v9.06“, welche für die hier beschriebenen numerischen Untersuchungen verwendet wird, basiert auf einem Finite-Volumen-Ansatz zur Simulation des Strömungsfeldes in der Euler'schen Betrachtungsweise. Unter Verwendung eines statistischen Turbulenzmodells werden die Reynolds-Averaged-Navier-Stokes-Gleichungen (RANS) diskretisiert und iterativ gelöst. Die entsprechenden Gleichungen können in der einschlägigen Literatur nachgelesen werden (PERIC und FERZIGER 2008).

Die Diskrete-Element-Methode (DEM), ursprünglich von CUNDALL und STRACK (1979) veröffentlicht, ist eine numerische Methode zur Simulation vieler interagierender, diskreter Objekte wie z. B. Partikel. Sie basiert auf der Lagrange'schen Modellierungstechnik unter Berücksichtigung von Kontaktkräften zwischen den Teilchen, die in den Bewegungsgleichungen auftreten. In der Software „Star-CCM + v9.06“ wird der Soft-Sphere-Ansatz verwendet. Dieses Modell erlaubt eine Überlappung der kollidierenden Partikel, die berechnete Kontaktkraft ist proportional zu dieser Überlappung. Das verwendete Hertz-Mindlin-Modell basiert auf einem nichtlinearen Feder-Dämpfer-Modell, das aus der Hertz-Mindlin-Kontakttheorie abgeleitet wurde.

Einschränkung des Parameterbereichs

Das Blockdiagramm in Abbildung 1 fasst die Ergebnisse der Untersuchungen verschiedener Autoren bezüglich des Parametereinflusses auf den Trennprozess zusammen (BECK 1992, FREYE 1980, SRIVASTAVA et al. 1990, HUISMAN 1978).

Das Diagramm veranschaulicht die Komplexität des Trennprozesses und die mehrschichtigen Abhängigkeiten zwischen Zielgrößen und Parametern. Die Beziehungen zwischen den Eigenschaften bzw. Parametern sind durch Pfeile gekennzeichnet. Im Blockdiagramm ist der begrenzte Parameterbereich der Simulation dargestellt, eingebettet in den gesamten Parameterbereich des realen Trennprozesses. Es wird unterschieden zwischen Eingabeparametern für die Simulation, die vom Benutzer direkt gesetzt werden, und solchen Parametern, die durch bestimmte Modelle gewonnen werden oder eine Überlagerung verschiedener Material- und Partikeleigenschaften darstellen (abgeleitete Eigenschaften).

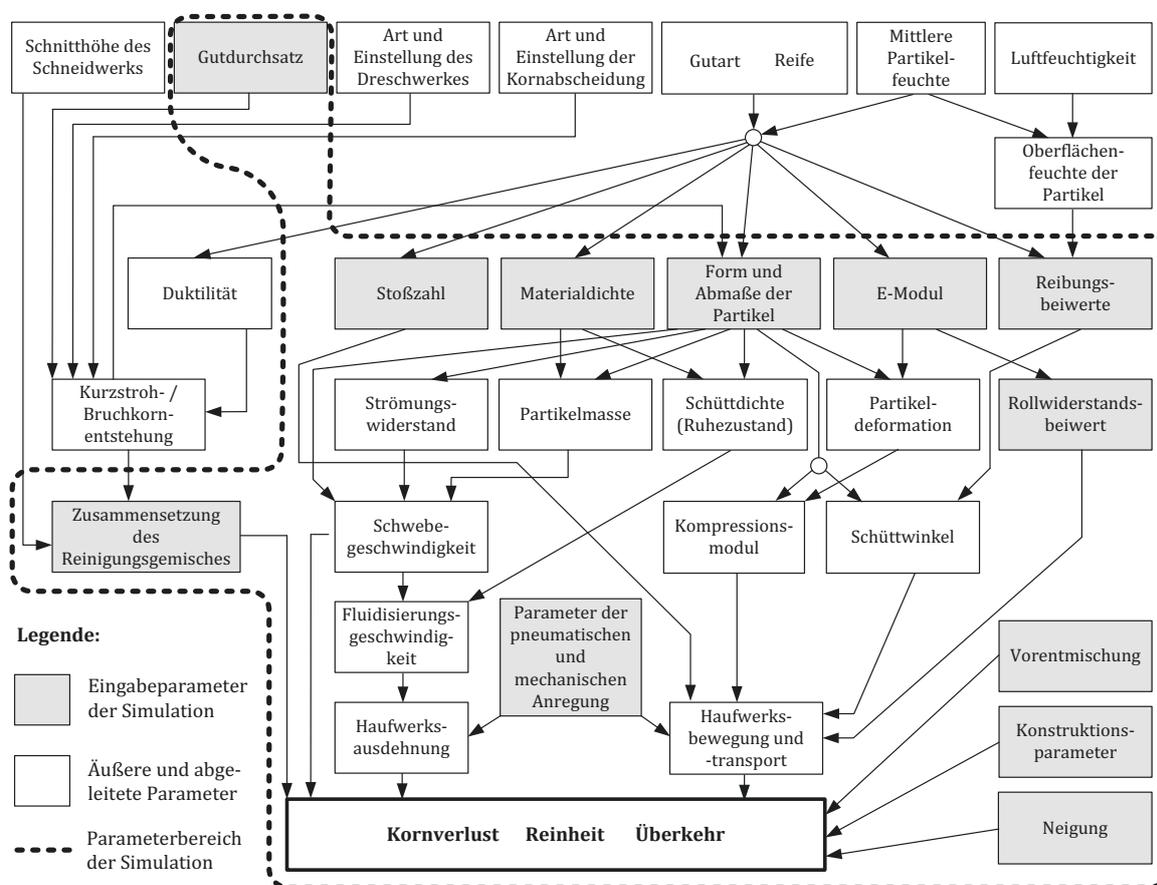


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Zielgrößen (Kornverlust, Reinheit und Überkehr) und Prozessfaktoren (Umgebungsbedingungen, Partikeleigenschaften usw.) des Trennprozesses; Kennzeichnung der direkten Eingabeparameter der Simulation

Lösungsstrategie

Abbildung 2 zeigt die angewandte Lösungsstrategie. In Stufe 1 wird der Trennprozess in der Simulation und im Experiment stark abstrahiert. Dies bezieht sich einerseits auf die Größe der Domäne, die einen 200 × 200 mm großen Ausschnitt des Obersiebes der Reinigungsanlage repräsentiert. Hierdurch wird die Anzahl an Partikeln und damit der Rechenaufwand reduziert, was eine höhere Anzahl an Berechnungen erlaubt. Andererseits erfolgt die Trennung der Partikel nicht als kontinuierlicher Prozess, sondern ausgehend von einem Schicht-System. Die mechanische Schwingung und die Anströmung der Luft sind rein vertikal, was es ermöglicht, den Transportprozess entlang des Siebes zu vernachlässigen und die Wirkmechanismen der Trennung hervorzuheben. Die DEM-Partikel werden auf Basis von gemittelten bzw. ausgewählten Werten der Literaturanalyse modelliert und parametrisiert. Diese anfängliche Konfiguration enthält Teilchen für Korn, Spreu und Kurzstroh, welche jeweils aus einer gewissen Anzahl an Kugeln aufgebaut sind, um die Form realer Partikel anzunähern. Das hier beschriebene vereinfachte Simulationsmodell wird verwendet, um eine grundlegende und umfassende numerische Parameter-Sensitivitätsstudie der Material-, Partikel-, Kontakt- und Interaktionseigenschaften durchzuführen. Entsprechende Experimente werden zum Vergleich mit den numerischen Ergebnissen durchgeführt. Dieser Vergleich basiert auf makroskopischen Werten wie

Trennzeit und Kornreinheit. An dieser Stelle sei erwähnt, dass sowohl die Simulation als auch das Experiment die geometrischen Dimensionen von Korn- und Strohteilchen als die einflussreichsten Parameter auf den Trennprozess identifizieren.

Daher wird in Stufe 2 eine Probe von gehäckseltem Stroh, welches in Laborversuchen meist anstelle von Spreu verwendet wird, durch eine Siebmaschine in Längensklassen eingeteilt. Anschließend wird eine Probe jeder Längensklasse manuell in folgende Komponenten getrennt: gerade Halme, geknickte Halme, Ähren und Blätter. Danach wird eine gewisse Anzahl von geraden und geknickten Halmen hinsichtlich Länge und Breite unter Verwendung digitaler Bildverarbeitung mit Matlab[®] vermessen. Zusätzlich wird die Masse der einzelnen Partikel durch Wiegen bestimmt und die mittlere Partikelmasse sowie deren Standardabweichung berechnet.

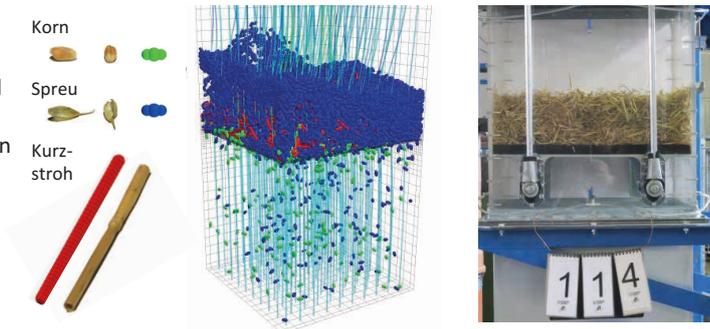
Die mittleren Partikelabmessungen und Werte zur Beschreibung ihrer statistischen Verteilung werden in Stufe 3 in Star-CCM + v9.06 durch Normalverteilungsfunktionen implementiert. Das Partikelvolumen und die Partikelmasse sind davon direkt abhängige Größen und unterliegen demnach einer entsprechenden Verteilung.

Gemäß der Literatur (T. BECK 1992) beeinflusst die Feuchte die Zielgrößen des Trennprozesses nicht direkt; vielmehr werden Materialeigenschaften beeinflusst, welche den Trennprozess beeinflussen. Diese Aussage gilt in einem Bereich mit mittlerer Partikelfeuchte, der unter dem Niveau liegt, ab welchem die Kohäsionskräfte aufgrund hoher Oberflächenfeuchte dominieren. Die mittlere Partikelfeuchte beeinflusst u. a. die Partikelabmessungen, die Partikeldichte, die statischen und dynamischen Reibungskoeffizienten sowie den Restitutionskoeffizienten. Diese Eigenschaften werden in Stufe 4 als benutzerdefinierte Funktionen in die Simulation implementiert. Die UDF (User Defined Function) drückt den Wert des Parameters in Abhängigkeit der mittleren Partikelfeuchte auf Basis eines quadratischen Modells aus.

In Stufe 5 werden die geometrische Größe und die Komplexität des Simulationsmodells gesteigert. Numerische und experimentelle Versuche zur Entmischung von Korn und NKB in einem Segment einer Reinigungsanlage werden durchgeführt. Das bevorzugte Partikeldesign, die Parametrierung und die Modelle der Stufen 1 bis 4 werden übernommen. Die bisher verwendeten DEM-Partikel für Spreu werden durch gerade und geknickte Strohhalme mit normalverteilten Dimensionen (Länge und Durchmesser) ersetzt, welche das im Experiment verwendete Häckselstrohgemisch repräsentieren. Dem Simulationsmodell wird eine mechanische und pneumatische Anregung aufgeprägt, welche den Trennprozess als auch den Materialtransport entlang der Siebe bewirkt. Eine Parameterstudie wird durchgeführt, wobei hauptsächlich Prozessparameter wie NKB-Durchsatz, NKB-Zusammensetzung und die Intensität der mechanischen und pneumatischen Anregung untersucht werden. Ein Laborprüfstand ist entsprechend dem numerischen Modell aufgebaut um vergleichende experimentelle Tests durchführen zu können.

Stufe 1:

Vergleichende numerische und experimentelle Trennprozesse in einer vertikal schwingenden Box

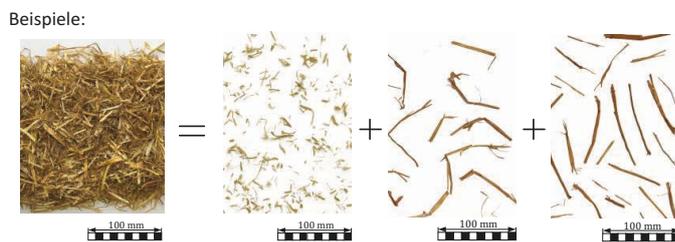


Ergebnisse:

- Nachweis der Anwendbarkeit der numerischen Methode (CFD-DEM)
- Beurteilung der Qualität der DEM-Partikel Modellierung
- Sensitivität der Parameter
- Kalibrierung der Parameter
- Identifikation weiteren Forschungsbedarfs

Stufe 2:

Detaillierte Analyse des Häckselstrohgemisches – Längenklassierung, Massebestimmung, Abmaße und Streuung

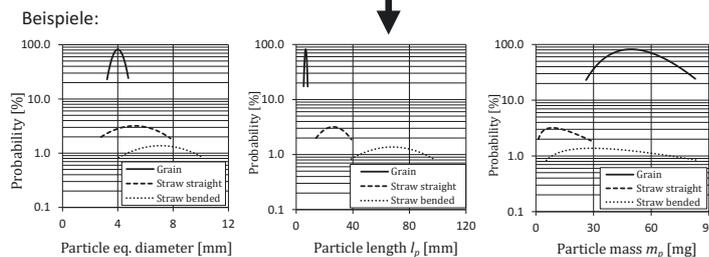


Ergebnisse:

- Länge, Durchmesser, Masse sowie Std.-Verteilung dieser Größen
- Unterscheidung zwischen geraden und geknickten Halmen
- Einfluss der Halmlänge auf den Trennprozess

Stufe 3:

Modellierung von DEM-Partikeln mit streuenden Abmaßen und Eigenschaften

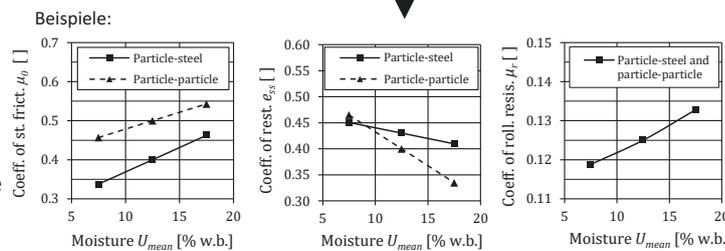


Ergebnisse:

Injektion von Partikeln mit normalverteilten Dimensionen und davon abhängigen Eigenschaften (Masse etc.)

Stufe 4:

Modellierung des Einflusses der mittleren Partikelfeuchte auf ausgewählte Partikeleigenschaften

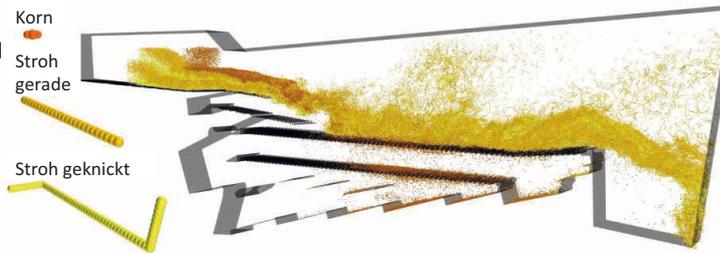


Ergebnisse:

Feuchteabhängige Parametrierung der DEM-Partikeleigenschaften (Dimensionen etc.) und Interaktionseigenschaften (Kontakt etc.)

Stufe 5:

Vergleichende numerische und experimentelle Trennprozesse in einem Segment einer Mähdröschereinigungsanlage



Ergebnisse:

- Kornverlust, Abscheidelänge, Reinheit, Überkehr und charakteristische Abscheidekurve
- Einfluss des NKB-Durchsatzes, der Strömungseigenschaften etc.

Abbildung 2: Lösungsstrategie

Numerisches Modell und Rechenlauf

Die nachfolgende Beschreibung des Simulationsaufbaus und die Diskussion der Ergebnisse konzentrieren sich die Stufe 5: Simulation des Trennprozesses in einem Segment der Reinigungsanlage. Die Ergebnisse der vorangegangenen Stufen wurden z.T. bereits veröffentlicht (KORN 2014). Das dreidimensionale Modell (Abbildung 3) basiert auf der Geometrie einer existierenden Reinigungsanlage. Das Modell hat gegenüber der realen Geometrie eine reduzierte Ausdehnung in Fahrzeugbreitenrichtung, welche 200 mm beträgt. Die Ausdehnung in Fahrzeuginnenrichtung ($\approx 4\,390\text{ mm}$) und alle anderen Abmessungen entsprechen den ursprünglichen Dimensionen. Die Lamellen von Ober- und Untersieb repräsentieren detailgetreu die Originalgeometrie. Um den Rechenaufwand zu reduzieren, entfällt die Modellierung des Gebläses. Stattdessen wird der zugeführte Luftstrom auf den Hauptkanal und auf den Nebkanal als Randbedingung aufgeprägt. Die Vektoren der Strömungsgeschwindigkeit am Querschnitt des jeweiligen Kanals werden von zuvor durchgeführten numerischen Simulationen und Experimenten übernommen. Um die Komplexität weiter zu reduzieren, wird die typischerweise gegenläufige Bewegung von Ober- und Untersieb vernachlässigt. Das gesamte Modell oszilliert mit Frequenz, Amplitude und Schwingungsrichtung des Obersiebes. Der Aufbau des Rücklaufbodens (Unterseite des numerischen Modells) unterscheidet sich von der ursprünglichen Reinigungsanlage. Die Mulden für Korn- und Überkehrschnecke sind nicht vorhanden. Stattdessen ist der Boden aus sechs Kaskaden aufgebaut, um die Menge der entlang von Ober- und Untersieb abgeschiedenen Körner zu klassifizieren. Während in der Simulation eine kontinuierliche Abscheidkurve ermittelt werden kann, ist eine Klassiereinrichtung im Hinblick auf die experimentelle Versuchsdurchführung unumgänglich.

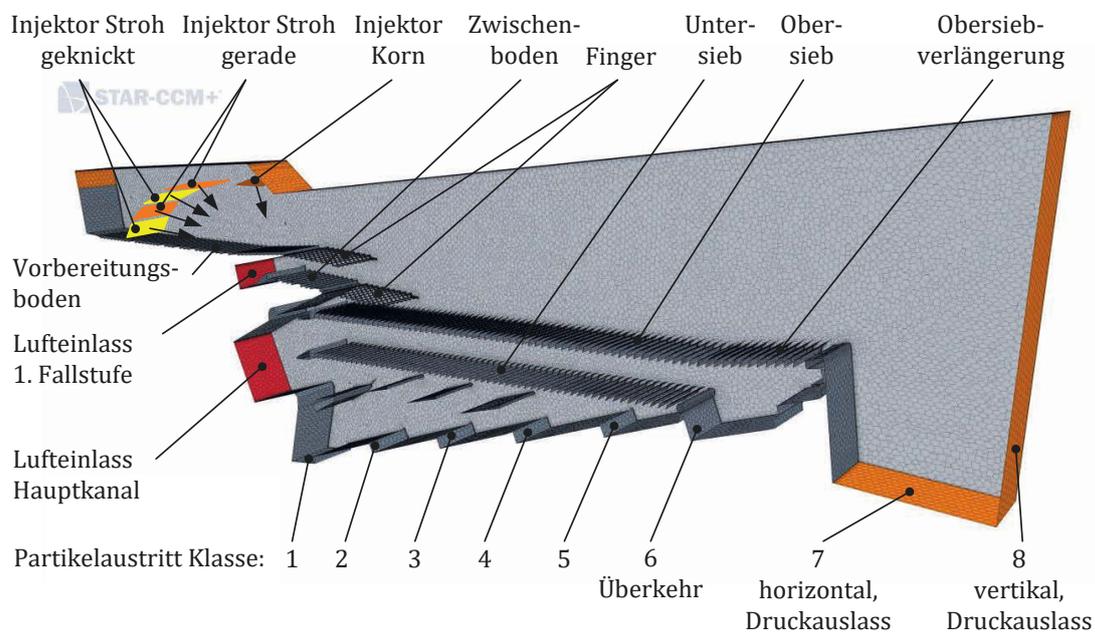


Abbildung 3: CFD-DEM-Modell des Segmentes der Mährescherreinigungsanlage

Tabelle 1: Modelle und Einstellungen des Simulationsmodells (Standardkonfiguration)

Eigenschaft	Wert
Modellbreite	200 mm
Anzahl Netzzellen	1,33 Mio.
Wandreibung an den Seitenwänden	Ohne Reibung
Luftdichte (20 °C)	$\rho_f = 1,184 \text{ kg/m}^3$ (inkompressibel)
Dyn. Viskosität Luft (20 °C)	$\mu = 1,85508 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s}$
Gravitation	$g = 9,81 \text{ m/s}^2$
Erhaltungsgleichungen	URANS
Druck-Geschwindigkeits-Kopplung	Gekoppelt
Räumliche Diskretisierung	2. Ordnung Aufwind, implizit
Zeitliche Diskretisierung	2. Ordnung, implizit
Zeitschrittweite	0,001 s
Löser	AMG linear
Turbulenz	Realizable k- ϵ two-layer mit all y+ wall treatment
DEM-Partikel	Kugelverbund, starr
Widerstandsmodell (Kraft)	Gidaspow
Widerstandsmodell (Drehmoment)	Sommerfeld
Partikel-Fluid-Interaktion	Zwei-Wege-Kopplung
DEM-Kontaktmodell	Hertz-Mindlin
Rollwiderstandsmodell	Kraftproportional
Massestromverhältnis Korn : NKB in %	70 : 30

Abbildung 3 zeigt, dass gerade und geknickte Strohpartikel in zwei alternierenden Schichten über dem Vorbereitungsboden in das numerische Modell injiziert werden. Aufgrund der Einschränkungen der Partikelinjektor-Definition der eingesetzten Softwareumgebung ist eine Mischinjektion nicht möglich. Durch Voruntersuchungen ist bestätigt, dass sich die geraden und geknickten Strohpartikel während der Bewegung entlang des Vorbereitungsbodens und der Fallstufen ausreichend vermischt haben, bevor die eigentliche Entmischung und Abscheidung auf dem Obersieb beginnt. Die Körner werden von oben auf die Strohschicht aufgegeben. Diese Bedingungen des Guteintrittes stellen das anspruchsvollste Szenario für die Reinigungsanlage dar und sind mit dem experimentellen Versuchsstand sehr gut reproduzierbar.

Die Injektion der Strohpartikel beginnt gleichzeitig mit der Oszillationsbewegung des numerischen Modells bei $t = 0 \text{ s}$. Durch die Position und das verzögerte Einsetzen der Korninjektion bei $t = 0,3 \text{ s}$ wird sichergestellt, dass das Korn auf eine entwickelte Strohschicht fällt. Nach einer physikalischen Zeit von etwa $t = 10 \text{ s}$ zeigt das System ein stationäres Verhalten. Die Gutschicht auf dem Obersieb ist voll entwickelt und der Kornverlust ist auf einen bestimmten Wert konvergiert. Nun beginnt die Periode der Datenauswertung, die $\Delta t = 2 \text{ s}$ dauert. Bei einer physikalischen Zeit von $t = 12 \text{ s}$ wird die Simulation gestoppt. Jeder Lauf dauert zwischen $\approx 21\,000$ CPU-Stunden (für niedrigen NKB-Durchsatz) und $37\,000$ CPU-Stunden (für hohen NKB-Durchsatz). Durch die Parallelisierung der Berechnung auf 96 CPU-Kerne beträgt die verstrichene Zeit des Löfers zwischen 218 und 385 Stunden für einen Rechenlauf.

Ergebnisse und Diskussion

Das bisher durchgeführte Testprogramm enthält als Parameter u. a. den NKB-Durchsatz, die Luftgeschwindigkeit am Hauptkanal und am Nebenkanal der 1. Fallstufe (mit Faktoren multipliziert, um unterschiedliche Drehzahlen des Gebläses zu simulieren), das Massenverhältnis von geknickten zu geraden Strohhalmen, die mittlere NKB-Teilchengröße als auch deren Verteilung, die Turbulenzintensität am Hauptkanal, die Kornfeuchte und die Strohfeuchte basierend auf den oben beschriebenen Modellen, die NKB-Partikeldichte, den E-Modul, die Öffnungsweite von Ober- und Untersieb als auch die Schwingfrequenz und die Schwingamplitude. An dieser Stelle kann daher nur ein Auszug der Ergebnisse dargestellt werden. Abbildung 4 zeigt exemplarisch eine Momentaufnahme der CFD-DEM-Simulation nach Ablauf einer physikalischen Zeit von 12 s. Die Materialschicht ist voll entwickelt. Der Luftstrom wird durch Stromlinien angezeigt. Einzelne Strohhalmteilchen befinden sich in der Schwebe und werden vom Luftstrom aus dem System gefördert.

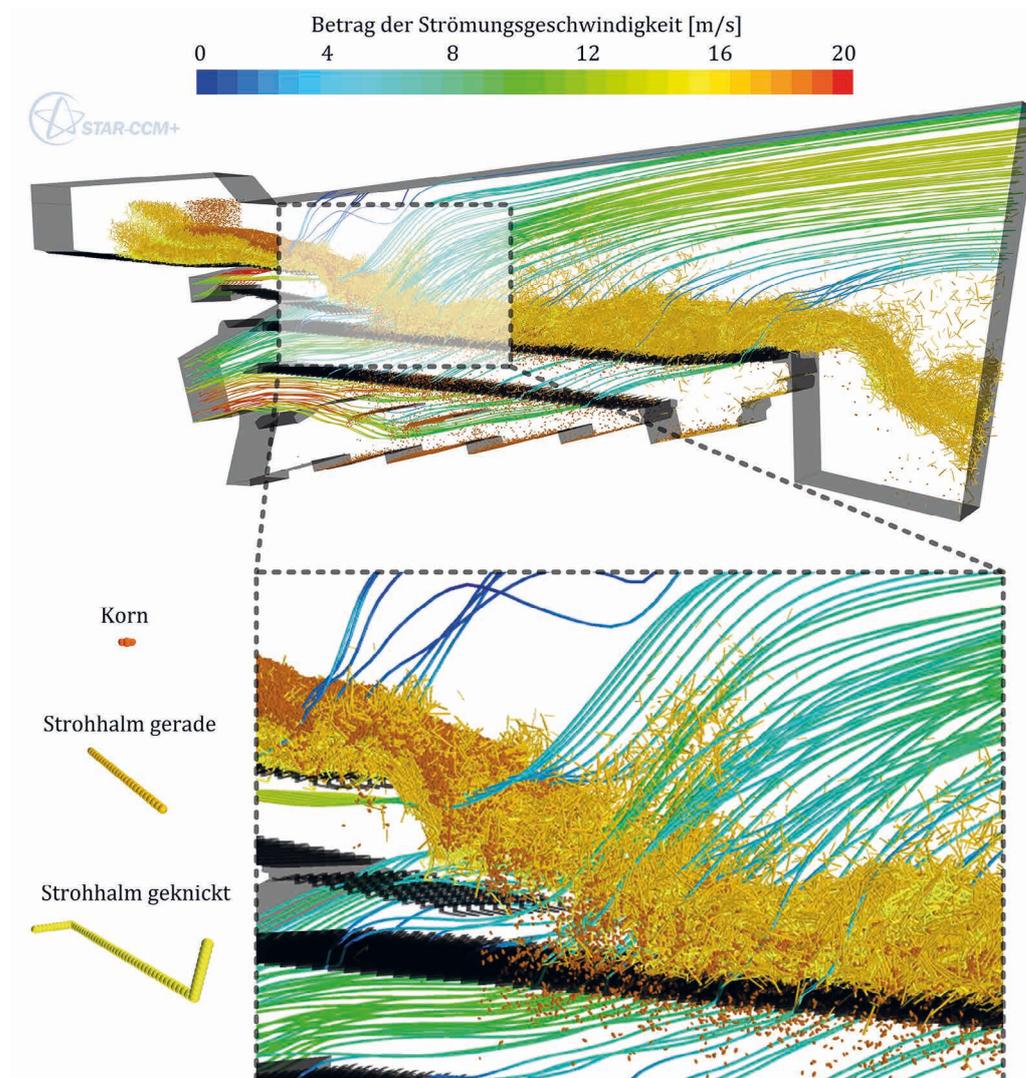


Abbildung 4: Beispielhafte grafische Darstellung der Ergebnisse: DEM-Partikel (Legende nicht maßstäblich) und Stromlinien (Farbe entsprechend Strömungsgeschwindigkeit)

Im Rahmen des Testprogramms wird der Partikelinjektordurchmesser, welcher dem kugeläquivalenten Durchmesser entspricht, der NKB-Partikel (gerade und geknickte Strohhalme) mit einem Faktor auf den Stufen 0,7, 0,8, 0,85, 1,0, 1,15, 1,2 und 1,3 multipliziert. Ein Faktor von 1,0 entspricht der Nenngröße der Strohteilchen, welche in Stufe 2 (s. o.) ermittelt wurde. Die Länge der DEM-Partikel ist direkt abhängig vom Partikelinjektordurchmesser, da dieser den Abstand der einzelnen Kugeln der Kugelverbundpartikel definiert. Die Korngröße wird nicht variiert. Wie Abbildung 5 links zeigt, wird der Kornverlust signifikant durch die Größe der Strohpartikel beeinflusst. Die Standardabweichung der Testwiederholungen ist den Daten im Diagramm hinzugefügt, um die Signifikanz anzudeuten. Bei Verwendung von größeren Strohteilchen tendiert der Kornverlust zu geringeren Werten. Es wird davon ausgegangen, dass dieses Verhalten auf den größeren Zwischenräumen zwischen den großen Strohpunkten beruht, wodurch der Durchgang des Kornes durch die Strohschicht erleichtert wird. Diese Lücken werden für kleinere Strohteilchen enger, selbst wenn der mittlere Hohlraumanteil über den gesamten Bereich der getesteten Partikelgröße nahezu konstant ist.

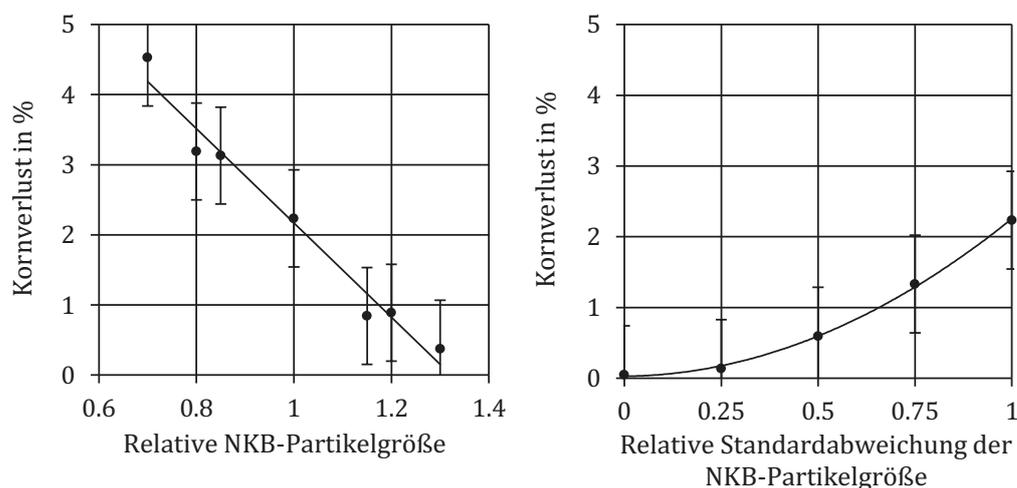


Abbildung 5: Ergebnisse der Simulation – links: Kornverlust in Abhängigkeit von der NKB-Partikelgröße, rechts: Kornverlust in Abhängigkeit von der Standardabweichung der NKB-Partikelgröße (Parameter: NKB-Durchsatz $q_{\text{NKB}} = 1,79 \text{ kg}/(\text{s m})$, Faktor der Strömungsgeschwindigkeit am Hauptkanal = 1)

Basierend auf der Häckselstrohanalyse und der Partikelmodellierung der 2. und 3. Stufe (s. o.), werden die Partikel mit einem normalverteilten Durchmesser injiziert. Im Rahmen des Testprogramms wird ein Faktor von 0, 0,25, 0,5 und 0,75 mit der Standardabweichung des Partikelinjektordurchmessers von geraden und geknickten Strohhalmen multipliziert. Ein Faktor von 1 stellt die nominale Standardabweichung basierend auf den Ergebnissen der Stufe 2 dar. Die Standardabweichung der injizierten Kornpartikel wird nicht variiert. Wie in Abbildung 5 (rechts) gezeigt wird, tritt nahezu kein Kornverlust auf, wenn alle Partikel der jeweiligen NKB-Klasse die gleiche Größe haben (Standardabweichung von 0). Bei steigenden Werten der Standardabweichung nimmt der Kornverlust überproportional zu. Dies bestätigt die obige Aussage, dass die Entmischung relativ einfach verläuft, wenn nur große Partikel im System vorhanden sind. Wenn andererseits kleinere Partikel hinzugefügt werden, füllen diese die Lücken zwischen den großen Partikeln und erschweren somit den Durchgang von Korn durch die Strohschicht.

Die in Stufe 2 analysierte Häckselstrohprobe besteht aus 73 % geraden und 27 % geknickten Strohhalmen, was bisher als Standardkonfiguration für die numerischen Tests verwendet wurde. Im Folgenden wird dieses Verhältnis variiert und die Korrelation zum Kornverlust bewertet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 (links) dargestellt. Das Massestromverhältnis von Korn zu NKB beträgt bei allen Rechnungen 70 : 30. Bei einem Wert von 30 % besteht der gesamte NKB-Durchsatz aus geknickten Strohhalmen (Abbildung 6). Die Korrelation zum Kornverlust kann durch eine Exponentialfunktion angenähert werden. Bis zu etwa Anteil von 10 % an geknickten Strohhalmen am NKB-Durchsatz ist die Korrelation zum Kornverlust durch eine moderate Steigung gekennzeichnet. Ein höherer Anteil verursacht einen überproportionalen Anstieg des Kornverlusts. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die geknickten Strohhalme einen wesentlichen Einflussfaktor für den Trennprozess darstellen. Ihr Anteil kann verwendet werden, um das numerische Modell an die Experimente anzupassen.

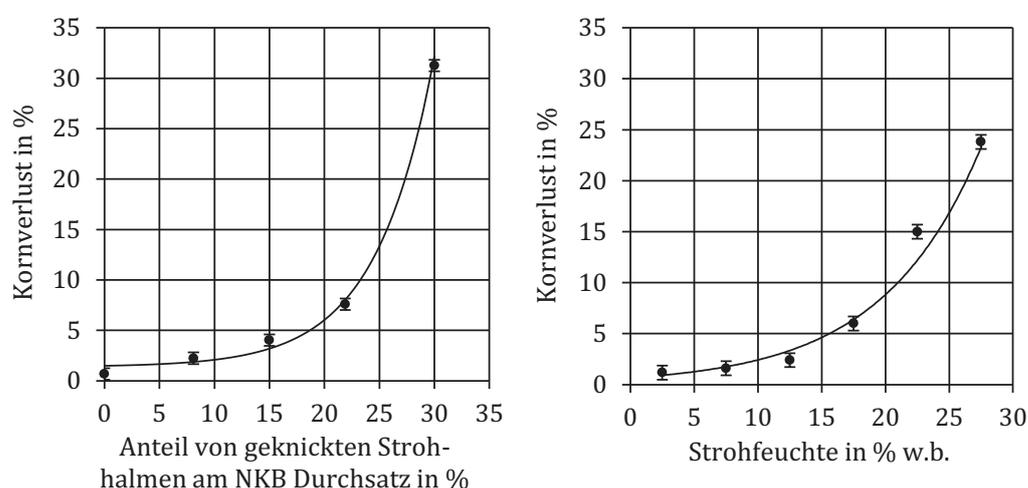


Abbildung 6: Ergebnisse der Simulation – links: Kornverlust in Abhängigkeit des Anteils von geknicktem Stroh am NKB-Durchsatz, rechts: Kornverlust in Abhängigkeit der Strohfeuchte (Parameter: NKB-Durchsatz $q_{\text{NKB}} = 1,79 \text{ kg}/(\text{s m})$, Faktor der Strömungsgeschwindigkeit am Hauptkanal = 1)

Um die Wirkung des Feuchtemodells (siehe Stufe 4) auf die numerischen Ergebnisse zu untersuchen, wird der Bereich der Strohfeuchte über den bei der Ernte praxisüblichen Bereich hinaus ausgedehnt. Werte zwischen 2,5 und 27,5 % werden getestet. Abbildung 6 (rechts) zeigt, dass der Zusammenhang zwischen Kornverlust und Strohfeuchte gut mit einer Exponentialfunktion beschrieben werden kann. Bei niedriger Feuchte nimmt der Kornverlust nur leicht zu. Ab einer Feuchte von ca. 12,5 % steigt der Kornverlust schnell auf bis zu 24 % an. Das bisher durchgeführte experimentelle Testprogramm beinhaltet keine Tests mit unterschiedlicher NKB-Feuchte. Ohne eine Basis für den experimentellen Vergleich kann lediglich der Schluss gezogen werden, dass der Einfluss der Strohfeuchte in den numerischen Berechnungen plausibel ist und die praktische Erfahrung widerspiegelt.

Zur Validierung des numerischen Modells der Reinigungsanlage wird ein experimenteller Versuchsstand nach Abbildung 7 verwendet. Der vom CFD-DEM-Modell erfasste Bereich ist ergänzend im Schema angegeben. Im Gegensatz zu den Simulationen hat der Prüfstand eine Breite von 700 mm, um die Wandeffekte der Seitenwände gering zu halten.

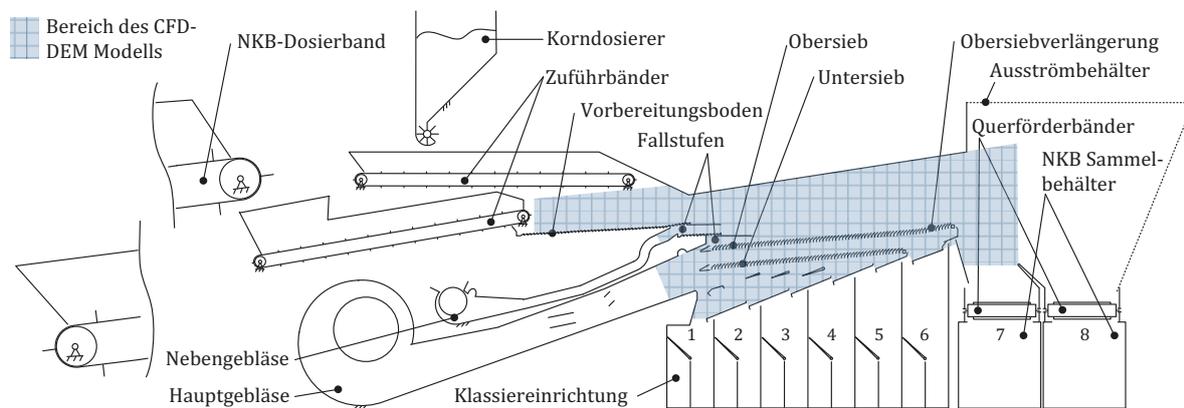


Abbildung 7: Schematischer Aufbau des Reinigungsversuchstandes und Darstellung des vom CFD-DEM Modell erfassten Bereichs

Bild 8 zeigt eine Momentaufnahme einer Simulation und eines Experiments für einen relativen NKB-Durchsatz von $q_{\text{NKB}} = 2,38 \text{ kg}/(\text{s m})$, was einem NKB-Durchsatz von 12 t/h bei voller Systembreite entspricht. Der rein visuelle Vergleich zeigt eine ähnliche Höhe und Auflockerung der Gutschicht sowie das Auftreten von schwebenden oder pneumatisch transportierten Strohteilchen an den gleichen Positionen in der Reinigungsanlage. Diese befinden sich unmittelbar hinter den Fallstufen und im Bereich der Obersiebverlängerung.



Abbildung 8: Momentaufnahmen des numerischen (oben) und des experimentellen Trennprozesses (unten) in einer Mähdescherreinigungsanlage während der stationären Phase bei einem relativen NKB-Durchsatz $q_{\text{NKB}} = 2,38 \text{ kg}/(\text{s m})$

Der Zusammenhang zwischen der relativen Strömungsgeschwindigkeit am Hauptkanal (ausgedrückt durch einen Faktor, mit dem die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit multipliziert wird) und dem Kornverlust ist in Abbildung 9 für verschiedene relative NKB-Durchsätze dargestellt. Die Kennlinien zeigen gleichermaßen bei Simulation und Experiment eine Verschiebung des Optimums zu höheren Strömungsgeschwindigkeiten bei höherem NKB-Durchsatz, was durch die gestrichelte Linie angedeutet ist. Im Experiment ist das Optimum leicht zu höheren Strömungsgeschwindigkeiten verschoben und hängt stärker vom NKB-Durchsatz ab. Bei niedrigen und mittleren NKB-Durchsätzen stimmt die Simulation sehr gut mit dem Experiment überein. Größere Abweichungen treten insbesondere bei hohen NKB-Durchsätzen auf, z. B. $q_{NKB} = 2,38 \text{ kg/(s m)}$. Hier zeigt die Simulation ein deutlich sensitiveres Verhalten bei Variation der Strömungsgeschwindigkeit, was sich aus dem Kornverlustniveau an den äußeren Grenzen der Kennlinie ableiten lässt. An dieser Stelle besteht erheblicher Klärungs- und Optimierungsbedarf. In Anbetracht aller Vereinfachungen des numerischen Modells, der Abstraktion der DEM-Partikel gegenüber realen Partikeln und der Vielzahl an Parametern kann jedoch geschlussfolgert werden, dass Abbildung 9 den fundamentalen Beweis der Anwendbarkeit der gekoppelten CFD-DEM-Simulation für den Trennprozess in Mährescherreinigungsanlagen darstellt.

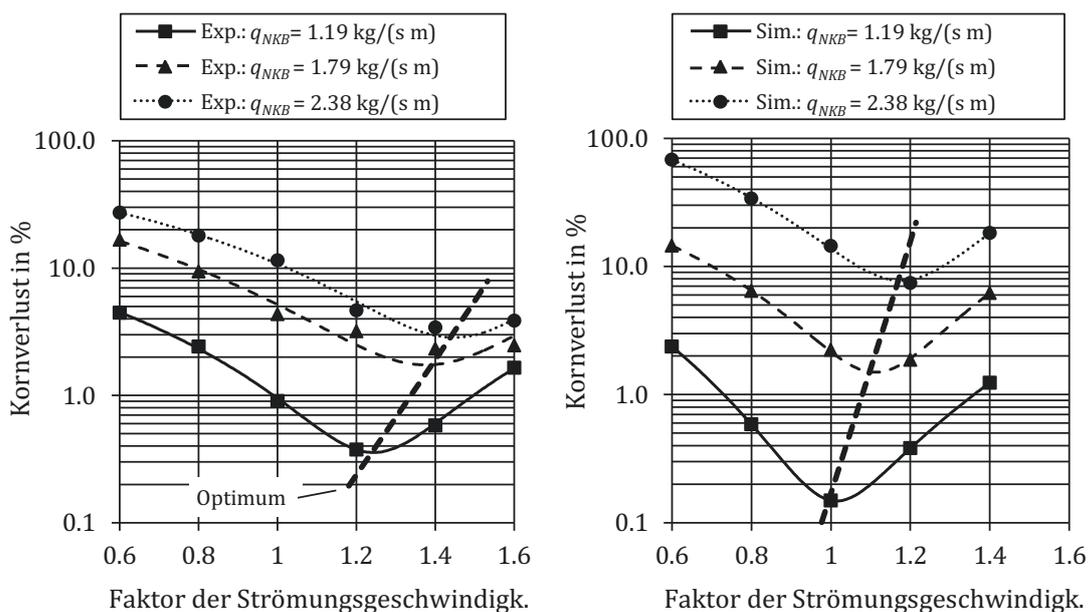


Abbildung 9: Abhängigkeit des Kornverlustes von der Strömungsgeschwindigkeit am Hauptkanal für verschiedene relative NKB-Durchsätze; Vergleich experimenteller Ergebnisse (links) und numerischer Ergebnisse (rechts); Faktor der Strömungsgeschwindigkeit repräsentiert Variation der Lüfterdrehzahl

Zusammenfassung und Ausblick

Der gekoppelte CFD-DEM-Ansatz eignet sich zur Simulation des Trennprozesses von Korn und Nichtkornbestandteilen in Mährescherreinigungsanlagen. Eine Unterscheidung zwischen geraden und geknickten DEM-Strohpartikeln ist in der Simulation notwendig, um einen Widerstand der Materialschicht gegenüber dem Korndurchgang zu erreichen. Das Verhältnis zwischen geknickten und geraden Strohpartikeln kann verwendet werden, um die Simulation an das Experiment anzupassen. Die Größe der DEM-NKB-Partikel sowie die Größenverteilung haben erheblichen Einfluss auf den Kornverlust. Das angewandte Feuchtemodell liefert plausible Ergebnisse, muss jedoch noch durch experimentelle Ergebnisse validiert werden. Die Simulation zeigt einen geringeren Kornverlust für größere NKB-Partikel, was entgegengesetzt zur experimentellen und praktischen Erfahrung ist. Um den Durchdringungswiderstand der Strohschicht gegenüber Körnern weiter an reale Verhältnisse anzupassen, finden daher derzeit Untersuchungen mit erweitertem Streubereich der NKB-Partikelgröße statt. Gegenüber dem Experiment reagiert die Simulation empfindlicher auf Veränderungen des Luftvolumenstroms. Gegenwärtig wird mithilfe von CFD-Analysen an angepassten Strömungswiderstandskoeffizienten für die DEM-Korn- und Strohpartikel gearbeitet, wobei die Form der DEM-Partikel und ihre Lage bezüglich der mittleren Strömungsrichtung berücksichtigt werden sollen.

Literatur

- Beck, F. (1999): Simulation der Trennprozesse im Mährescher. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 14 Nr. 92, VDI-Verlag, <http://opus.uni-hohenheim.de/volltexte/2014/905/>
- Beck, T. (1992): Meßverfahren zur Beurteilung des Stoffeigenschaftseinflusses auf die Leistung der Trennprozesse im Mährescher. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 14 Nr. 54, VDI-Verlag, <https://www.uni-hohenheim.de/qisserver/rds?state=medialoader&objectid=8298&application=Isf>
- Cundall, P. A.; Strack, O. D. L. (1979): A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique* 29, pp. 47–65
- Dahany, A. (1994): Verbesserung der Leistungsfähigkeit luftdurchströmter Schwingsiebe bei der Korn-Spreu-Trennung im Mährescher durch Optimierung der Luftverteilung, Dissertation, Universität Hohenheim, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der VDI-MEG Nr. 245
- Freye, T. (1980): Untersuchungen zur Trennung von Korn-Spreu-Gemischen durch die Reinigungsanlage des Mähreschers. Dissertation, Stuttgart-Hohenheim, Selbstverlag
- Hübner, R. (1999): Entwicklung eines Modells zur Auslegung einer rotierenden Reinigungseinrichtung im Mährescher, Dissertation, TU Dresden
- Huisman, W. (1978): Moisture content, coefficient of friction and modulus of elasticity of straw in relation to walker losses in a combine harvester. ASAE publication 1–78, pp. 25–29
- Korn, C., Herlitzius, T. (2014): Strömungssimulation als Entwicklungswerkzeug in der Mähdruschtechnik – Potential, Numerische Verfahren und Validierung. VDI-Bericht 2226, VDI-MEG Tagung LAND.TECHNIK, Berlin
- Lenaerts, B.; Aertsen, T.; Tijssens, E.; De Ketelaere, B.; Ramon, H.; De Baerdemaeker, J.; Saeys, W. (2014): Simulation of grain–straw separation by Discrete Element Modeling with bendable straw particles. *Computers and Electronics in Agriculture* 101, pp. 24–33
- Li, H.; Li, Y.; Gao, F. (2012): CFD-DEM Simulation of material motion in air- and screen cleaning device. *Computers and Electronics in Agriculture* 88, pp. 111–119
- Lu, G.; Third, J. R. Müller; C. R. (2015): Discrete element models for non-spherical particle systems: From theoretical developments to applications. *Chemical Engineering Science* 127, pp. 425–465
- Ma, Z.; Li, Y.; Xu, L. (2015): Discrete-element method simulation of agricultural particles' motion in variable-amplitude screen box. *Computers and Electronics in Agriculture* 118, pp. 92–99

- Peric, M.; Ferziger, J. H. (2008): Numerische Strömungsmechanik. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag
- Pförtner, J.; Böttiger, S. (2013): Validierungsstrategie für DEM-Modelle von Mährescherbaugruppen. VDI-MEG Kolloquium Landtechnik, Hohenheim 12./13.09.2013, Heft Nr. 40, S. 27–32
- Pförtner, J.; Böttiger, S.; Schwarz, M.; Schürmann, L. (2016): Simulation des Entmischungsprozesses von Korn und Kurzstroh. VDI-Tagung LAND.TECHNIK 2016, Köln, 22.–23. November 2016, VDI-Bericht Bd. 2273, S. 361–367
- Prüfer, A.; Englisch, J.; Schultze, M.; Meinel, T. (2014): ADALS – Beitrag zur DEM-Partikelsimulation in der Landmaschinenteknik. Landtechnik 69(4), S. 180–184, DOI: <http://dx.doi.org/10.15150/lt.2014.187>
- Rademacher, T. (2011): Druschfruchternte – Wettbewerb der Systeme nimmt zu. Eilbote 13, S. 10–13
- Schwarz, M.; Pförtner, J.; Mümken, P.; Böttiger, S. (2012): Gutbewegungsvorgänge auf dem Vorbereitungsboden, Erfahrungen mit der DEM-Software PASIMODO. VDI-Tagung LAND.TECHNIK 2012, Karlsruhe, 6.–7.11.2012, VDI-Bericht Bd. 2173, S. 363–369
- Srivastava, A. K.; Mahoney, W. T.; West, N. L. (1990): The effect of crop properties on combine performance. Transactions of ASAE 33(1), pp. 63–72
- Zhao, Y. (2002): Einfluss mechanischer und pneumatischer Parameter auf die Leistungsfähigkeit von Reinigungsanlagen im Mährescher. Dissertation, Universität Hohenheim, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der VDI-MEG Nr. 387
- Zhu, H. P.; Zhou, Z. Y.; Yang, R. Y.; Yu, A. B. (2008): Discrete particle simulation of particulate systems: A review of major applications and findings. Chemical Engineering Science 63(23), pp. 5728–5770

Autoren

Dipl.-Ing. Christian Korn ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und **Prof. Dr.-Ing. Thomas Herlitzius** ist Leiter des Instituts für Naturstofftechnik (INT) der Technischen Universität Dresden, Bergstraße 120, 01069 Dresden, E-Mail: korn@ast.mw.tu-dresden.de

Danksagung

Die numerischen Berechnungen wurden auf dem Bull HPC-Cluster des Zentrums für Informationsdienste und Hochleistungsrechnen (ZIH) der Technischen Universität Dresden durchgeführt. Vielen Dank für die großzügige Bereitstellung umfassender Rechenzeit und Rechenleistung.