

Andreas Prüfer, Jörg Englisch, Marten Schultze und Till Meinel

ADALS – Beitrag zur DEM-Partikelsimulation in der Landmaschinentechnik

Die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) kann als Werkzeug für die Simulation von Be- und Verarbeitungsprozessen von landwirtschaftlichen Granulaten genutzt werden. Allerdings werden hierfür Stoffmodelle benötigt, deren Erstellung und Parametrierung bislang äußerst aufwendig gewesen ist. Dieser Umstand stellt eine wesentliche Barriere für die Benutzung der DEM in kleinen und mittelständischen Unternehmen dar. ADALS (Anwenderfreundliche Discrete Element Method (DEM) – Datenbank für landwirtschaftliche Stoffe) soll dem Benutzer diese Modelle in einer einfachen Datenbank zur Verfügung stellen. Dazu wurden im Projekt Bestimmungsversuche für mechanische und morphologische Guteigenschaften konzipiert und Methoden zur Verifikation entwickelt.

eingereicht 23. April 2014

akzeptiert 30. Juni 2014

Schlüsselwörter

DEM, Elastizitätsmodul, Kompression, rotierende Trommel

Keywords

DEM, Young's Modulus, compression, rotating drum

Abstract

Prüfer, Andreas; Englisch, Jörg; Schultze, Marten and Meinel, Till

ADALS – Contribution to DEM particle simulation in agricultural machinery

Landtechnik 69(4), 2014, pp. 180–184, 5 figures, 10 references

The Discrete Element Method (DEM) is the tool of choice for simulation of agricultural material's processing. For this are needed granular matter models, whose generation and parametrization is costly. That fact prohibits the use of DEM within small and medium sized companies. ADALS (user friendly Discrete Element Method database for agricultural materials) fills this gap and provides these models via a simple database, for which has been designed a range of experiments for the determination of material properties and simulation verification.

Die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) beginnt, sich in der Simulation von Schüttgütern und Granulaten zu bewähren. In Forschungseinrichtungen und Unternehmen im Bereich der Landmaschinentechnik stößt die Simulationsmethode auf immer breiteres Interesse. Die 70. Internationale Tagung LAND. TECHNIK in Karlsruhe 2012 präsentierte das Thema der Fachwelt und widmete der DEM ein umfangreiches Plenum [1].

Grundlage der Diskrete-Elemente-Methode

Grundlage der DEM ist die Abbildung des Untersuchungsgegenstandes auf Basis von volumen- und massebehafteten Kugeln und Wänden innerhalb einer synthetischen physikalischen Umgebung. Diese definiert über geeignete Kontaktformulierungen wie Stoß, Reibung und Kraftfelder die Wechselwirkungsmöglichkeiten der Elemente. So wird letztendlich ein Konstrukt geschaffen, das die in der Wirklichkeit auftretenden Phänomene in den untersuchten Aspekten wiedergeben soll.

Für jede dieser Kugeln im Simulationsmodell wird vom numerischen Lösungsalgorithmus – oft über das „Central Difference Time Integration Scheme“ [2] – schrittweise die Bewegungsgleichung nach Newton mit den einwirkenden Kräften und Momenten und den daraus resultierenden Beschleunigungen aufgestellt und gelöst. Unter Beachtung der Anfangsbedingungen wird daraus die Geschwindigkeit und die neue Position der Kugel errechnet. Damit reiht sich die DEM in die Gruppe der netzfreien und zeitdiskreten Simulationsmethoden ein. In Erweiterung dieses Ansatzes lassen sich mittels Überlagerung der Kugeln zu Klumpen und der Einführung von Bindungskräften vielgestaltige Partikelformen und komplexes Materialverhalten bis hin zu Geweben darstellen.

Die Anwendungsperspektive

Viele Untersuchungen beschäftigen sich derzeit mit visuell erfassbaren Phänomenen und deren möglicher Abbildung. Langfristig bietet die DEM darüber hinaus – gekoppelt mit der Mehrkörper- und der Strömungssimulation – das Potenzial zur vollständigen virtuellen Abbildung von Be- und Verarbeitungsprozessen von granularen Stoffen. So können beispielsweise Trenn-, Misch- und Förderprozesse inklusive Rückwirkung auf die mechanischen Systeme simuliert werden. Den Kreis zwischen Maschinen-, Stoff-, Prozessmodell und Nutzer schließend, ermöglicht die DEM eine ganzheitliche Simulation.

Damit eröffnet sich für die Landmaschinenteknik die Möglichkeit zur kompletten Simulation von Sä-, Dünge- und Erntemaschinen inklusive ihrer komplexen Wirkstrukturen. Der Konstrukteur wird dadurch zukünftig in die Lage versetzt, seine Entwicklung bereits vor dem Bau eines ersten Prototyps virtuell auf Funktionsfähigkeit, Wirkung und Effizienz zu testen und in einer Prognose Belastungsannahmen für die Auslegung seiner Maschine zu generieren. Darüber hinaus ermöglicht die DEM einen tieferen Einblick in die im Material und an den Partikeln ablaufenden Prozesse bis hin zu Schädigungsmechanismen und zur Zerkleinerung.

Die Herausforderung

Wesentliche Bedingung für solch eine Simulation ist die mechanische Richtigkeit der Partikelmodelle. Das heißt, neben dem Ensembleverhalten der Partikel müssen sowohl die Impuls- als auch die Energiebilanzen im makroskopischen Maßstab stimmen, damit die daraus ermittelten Kräfte und Momente zu experimentell verifizierbaren Belastungsannahmen führen. Dazu ist es notwendig, dem zukünftigen Simulationsersteller ein Werkzeug in die Hand zu geben, welches ihm auf einfache Art und Weise Stoffmodelle zur Verfügung stellt, die für den abzubildenden Prozess geeignet sind. Diese derzeit noch bestehende Lücke will das Projekt ADALS füllen. Die Arbeitsziele gliedern sich in folgende vier Module:

- (A) Bereitstellung allgemein einsetzbarer Messverfahren zur Ermittlung der relevanten Modellparameter
- (B) Bereitstellung von Bewertungsverfahren der Modellgüte
- (C) Übertragung realer Partikelgemische in 3D-Modelle
- (D) Komprimierung und Verifizierung dieser Modelle

Das Projektziel

ADALS hat sich die Bestimmung, Sammlung und Aufbereitung von Stoffeigenschaften landwirtschaftlich genutzter Granulate wie Ernte-, Saatgut und Dünger für die DEM-Simulation zum Ziel gesetzt. Dazu muss die Form der jeweiligen Einzelpartikel des granularen Stoffes erfasst, vermessen und charakterisiert werden. Des Weiteren müssen die mechanischen Eigenschaften über mehrfach nutzbare und anwendungsnahe Experimente bestimmt und die Simulationen verifiziert werden. Schlussendlich dient eine projektbegleitend gepflegte Wissens- und Literaturdatenbank der Sicherung erarbeiteter Ergebnisse und

der Verankerung der Expertise auf dem Gebiet der granularen Medien am Institut.

Methodik

Im Rahmen des Projektes ADALS wird mit der Software EDEM (Vertrieb: DEM Solutions GmbH, Eschborn) simuliert. Die hierbei erarbeiteten Ansätze und Lösungen lassen sich allerdings auf andere gängige DEM-Simulationswerkzeuge übertragen. Auch wenn EDEM grundsätzlich offen für jede Art von Kontaktmodellen ist, wurde hier bewusst das Standard-Kontaktmodell nach Hertz-Mindlin gewählt. Hierfür sind die Eingabewerte für Poissonzahl, Schubmodul, Dichte, Restitutionskoeffizienten, Koeffizient der statischen Reibung, Rollreibungskoeffizient und Geometrie der Partikel notwendig. In **Abbildung 1** wird dies exemplarisch gezeigt; der Eingabebereich für die Material- und Kontakteigenschaften ist durch eine gestrichelte Umrandung hervorgehoben.

Das bedeutet allerdings nicht, dass diese Simulationsparameter mit ihren Werten denen in der Realität entsprechen. Denn systemtheoretisch betrachtet handelt es sich bei der DEM um eine funktionale Abbildung mit einer gewissen Analogie in der inneren Mikrostruktur [3]. So sind beispielsweise die realen Wirkmechanismen in den Partikelkontakten von realen Schüttgütern weitaus komplexer und vielgestaltiger, als dass dies mithilfe der DEM exakt abgebildet werden könnte [4]. Eine vollständige Identität zwischen dem Konstrukt in der Simulation und dem realen Objekt in der Wirklichkeit sollte, von einigen Spezialfällen abgesehen, daher ausgeschlossen sein. Das muss auch bei der Anwendung der DEM berücksichtigt werden.

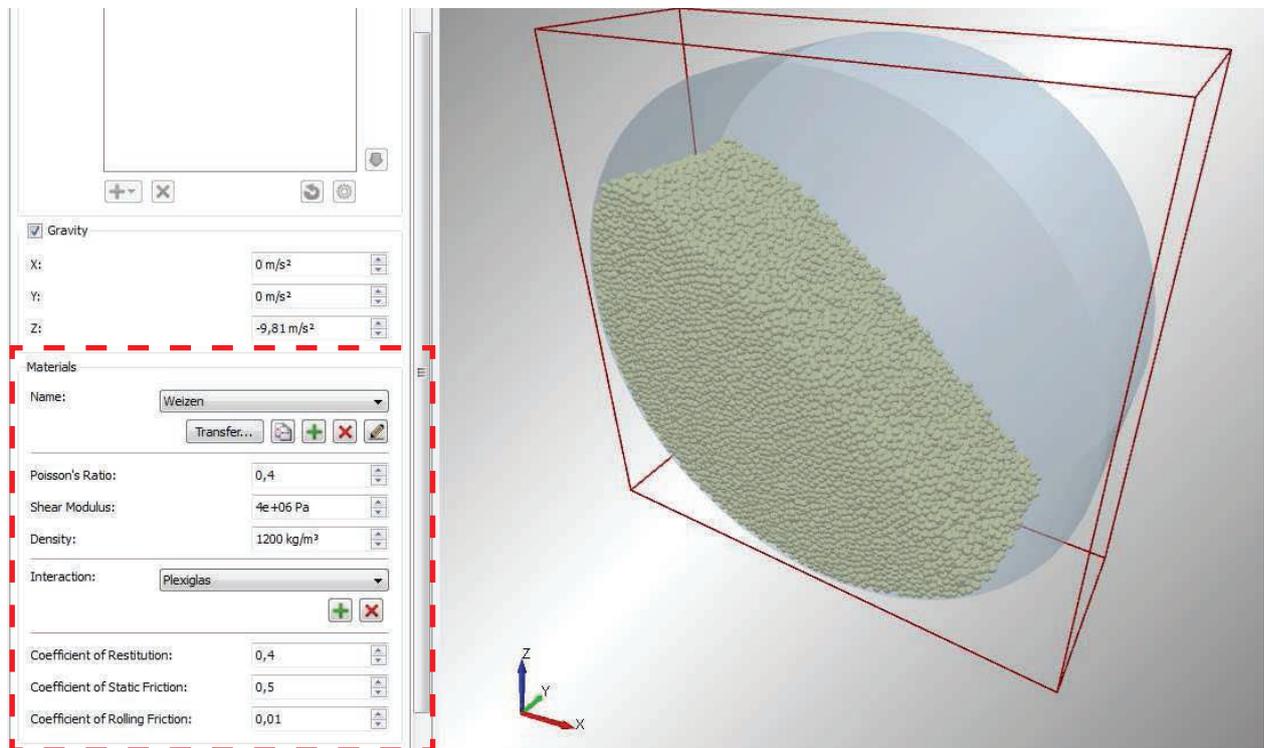
Konsequenterweise geht es bei ADALS um die Suche nach einem Formalismus auf Basis der Lösung von inversen Problemen, der es ermöglicht, für den zu untersuchenden Prozess unter Beachtung der Prognosegüte und des technischen Simulationsaufwandes geeignete Werte für die Simulationsparameter bereitzustellen. Ziel ist eine im vorgegebenen Toleranzbereich identische Aussage zwischen Simulation und Realität in den untersuchten Aspekten der auftretenden makroskopischen Phänomene.

Dazu ist es notwendig, die mechanischen Parameter in Bestimmungsexperimenten zu ermitteln und die Systemaussagen in Simulation und Realität zu verifizieren. Schwerpunkt im Projekt ADALS sind dabei der Kompressionsversuch zur Bestimmung des wirksamen Elastizitätsmoduls und des Restitutionskoeffizienten und der Trommelversuch zur Verifizierung der Simulation. Beide Versuche sind in der Fachpresse bereits beschrieben und fundiert untersucht worden.

Der Kompressionsversuch

Einer der Eingabeparameter bei EDEM ist der sogenannte Restitutionskoeffizient (Stoßzahl), als Maß für die während eines Stoßvorganges dissipierte kinetische Energie. Dieser stellt allerdings keine Materialeigenschaft, sondern ein Phänomen dar und ist, wie Schäfer et al. in [5] ausführen, neben dem Material

Abb. 1



Bildschirmfoto EDEM, Eingabeparameter für Partikeleigenschaften (in gestrichelter Linie umrandet), Simulation des dynamischen Böschungswinkels im Trommelversuch

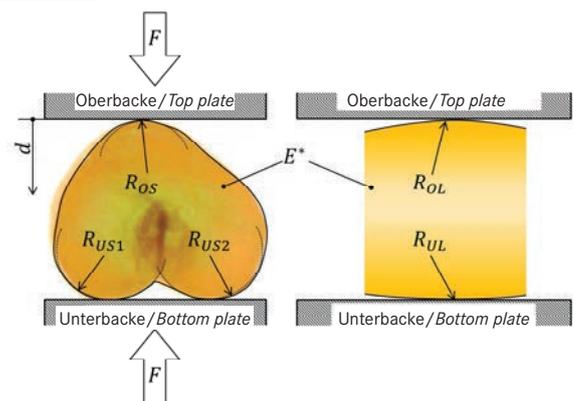
Fig. 1: Screenshot EDEM, entry for material parameters in dashed red rectangle, dynamic angle of repose within a rotating drum simulation

und der Form der Kontaktpartner eines Stoßes auch von den mechanischen Anfangsbedingungen (Ausgangsimpuls) abhängig. Eine vollständige und geschlossene Erklärung der komplexen mikroskopischen Vorgänge hierzu existiert nicht. Es bestehen lediglich Beschreibungsversuche.

Es zeigt sich weiterhin, dass bei Kompressionsversuchen mit Weizen zwischen planparallelen Stempeln nach Omarov [6] die Belastungsgeschwindigkeit einen wesentlichen Einfluss auf das mechanische Verhalten des Einzelkorns hat. Dementsprechend sollte nach seinem Vorschlag ein Kontaktmodell aus Feder-Dämpfungselementen mit Reibung zur Modellierung der Kontaktkräfte benutzt werden. Mit den bekannten Materialkennwerten, die über den Kompressionsversuch in Anlehnung an den Standard ASAE S368.4 DEC2000 „Compression Test of Food Materials of Convex Shape“ [7] an einer Universalprüfmaschine bestimmt werden, und dem Beschreibungsmodell zum Stoßvorgang kann für den Bereich niedriger Geschwindigkeiten die Restitution ausreichend genau prognostiziert werden [6].

Ausgangspunkt der Betrachtungsweise nach ASAE S368.4, auf die sich auch Omarov stützt, ist die Theorie vom elastischen Kontakt zwischen Kugel und Ebene nach Hertz. Diese lässt sich unter Einführung eines geometrisch gemittelten Krümmungsradius auf ellipsoid geformte Kontakte erweitern. So besitzt das in **Abbildung 2** exemplarisch dargestellte Weizenkorn zu den

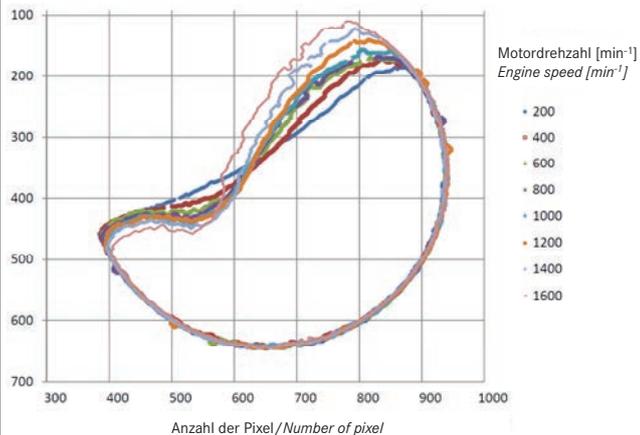
Abb. 2



Beispiel Kompressionsversuch an einem Weizenkorn, links in Schnittansicht rechts in Seitenansicht, F Kompressionskraft, R Kontaktradii, d Verformung, E^* wirksamer Elastizitätsmodul
Fig. 2: Example for the compression of a wheat-kernel, left in section, right in side view, F forces, R contact radii, d deflection, E^* apparent Young's Modulus

beiden parallelen Kompressionsbacken drei Kontaktstellen, die näherungsweise jeweils über ellipsoid gekrümmte Flächen beschrieben werden können. Das ermöglicht die Abbildung des mechanischen Gesamtverhaltens dieser drei Kontaktstellen als Reihenschaltung eines Einzelkontaktes mit zwei Parallelkon-

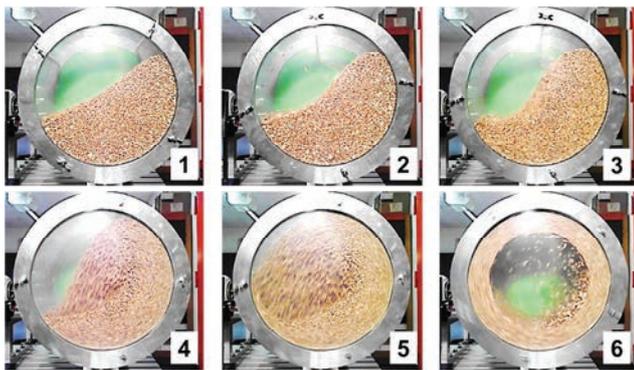
Abb. 3



Trommelversuch, Beispiel der Entwicklung der Ausformung der Gutoberfläche mit steigender Drehzahl

Fig. 3: Rotating drum experiment, evolution of the surface with increasing rotational speed

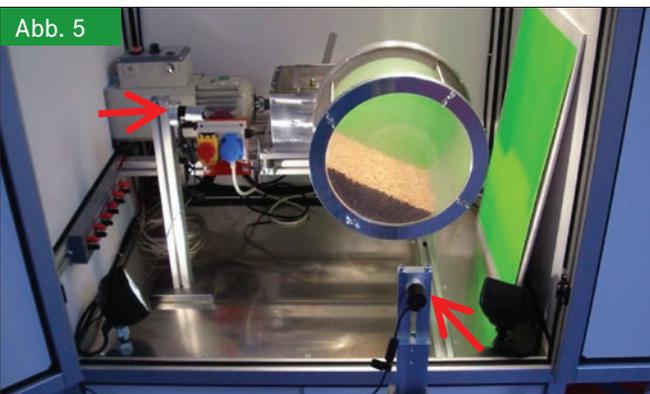
Abb. 4



Trommelversuch, Beispiel für die Entwicklung der Ausformung der Gutoberfläche mit steigender Drehzahl: (1) Lawinenbildung, glattes Abrutschen, (2, 3) Kaskadenbildung, (4, 5) Werfen, (6) Umförderung (Fotos: A. Prüfer)

Fig. 4: Rotating drum experiment, evolution of the surface with increasing rotational speed: (1) avalanching, (2, 3) cascading, (4, 5) cataracting, (6) centrifuging

Abb. 5



Trommelversuchstand, deutlich erkennbar ist der dynamische Schüttwinkel, Pfeile weisen auf die zwei Webcams (Foto: J. Englisch)

Fig. 5: Rotating drum experiment, dynamic angle of repose is clearly seen, arrows marking the webcams

takten und damit im Endeffekt die Ermittlung des Elastizitätsmoduls nach der Hertz'schen Theorie.

Die Hauptprobleme beim Kompressionsversuch von Naturstoffen im Experiment sind die Vielgestaltigkeit der Kontaktflächen und der Einfluss der Oberflächenrauheit und damit der einsetzenden Glättung im sich ausbildenden Anfangskontakt. Um Ersteres zu vereinfachen, wurde ein Stempelsystem mit austauschbaren Backen entwickelt, das den Test von in Epoxidklebstoff gebetteten Proben ermöglicht. Damit lassen sich nun die Kontakte isoliert betrachten. Für das zweite Problem musste die Auswertung der Kompressionskurve in Abwandlung der ASAE S368.4 angepasst werden. Dazu wurde die Kompressionskurve in einem vorgelagerten Schritt hinsichtlich ihrer Krümmung abschnittsweise untersucht und der Gültigkeitsbereich des Hertz'schen Kontaktes, charakterisiert durch den Kurvenexponenten, festgelegt. Dadurch wird der störende Einfluss des Anfangskontakts mit seiner wesentlich stärkeren Krümmung herausgefiltert. Die darauf folgende Regressionsrechnung zur Bestimmung der nichtlinearen Federsteife beschränkt sich auf dieses Analysefenster. Aus diesem Parameter wird nun nach ASAE S368.4 der Elastizitätsmodul berechnet.

Der Trommelversuch

Der Trommelversuch, bei dem Granulate in einer um ihre Längsachse rotierende Trommel hinsichtlich ihrer charakteristischen Gutbewegung bei unterschiedlichen Füllgraden und Drehzahlen untersucht werden, ist als Schwerpunkt zur Verifikation der Simulationsgüte ausgewählt worden. Die hier zu untersuchenden Phänomene sind vielfältig. Je nach Drehzahl lassen sich unterschiedliche Gutbewegungsregime beobachten [8] (**Abbildung 3** und **4**). Für die bildgebende Auswertung und den Vergleich mit der Simulation sind vor allem quasistationäre Phasen der Gutbewegung interessant, bei denen sich klar definierte Bewegungsmuster zeigen. Wichtigstes charakteristisches Phänomen und Messgröße ist hier der sich im niedrigen Drehzahlbereich einstellende dynamische Böschungswinkel [9].

Ausgehend von den Untersuchungen von Johnstone [10] wurde dessen Experimentalaufbau analysiert, wesentlich erweitert und um eine robuste Bildauswertung ergänzt (**Abbildung 5**). Dabei zeigte sich ein erheblicher Einfluss der Trommelgeometrie auf die zu untersuchenden Phänomene. Daher wurde ein vollkommen neuer Versuchsaufbau konzipiert. Der dazu konstruierte Trommeladapter lässt die Verwendung unterschiedlichster Durchmesser und Längen an Trommeln zu. Damit ist es möglich, Wand- und Manteleinflüsse auf die Gutbewegung getrennt voneinander zu untersuchen. Im Ergebnis lassen sich auf einfache Weise Experiment und Simulation optisch miteinander vergleichen. **Abbildung 3** zeigt beispielhaft für einen Füllgrad von über 50% die Veränderung der Ausformung der Oberfläche mit steigender Drehzahl. Sie beginnt im niedrigen Drehzahlbereich mit einer beinahe ebenen Fläche und geht mit der Steigerung der Drehzahl in eine immer stärker gekrümmte Form über. **Abbildung 4** zeigt Einzelframes der zugehörigen Videoaufnahmen.

Schlussfolgerungen

Im Projekt ADALS wurde eine Vielzahl von Bestimmungsversuchen für mechanische und geometrische Parameter entworfen und sowohl im Experiment als auch in der Simulation implementiert. Zurzeit folgen der Abschluss und die Auswertung von Versuchsreihen, die mit Raps, Weizen und Softair-Kugeln durchgeführt wurden. Währenddessen werden die Versuche auf eine Reihe weiterer Güter und den Feuchtigkeitseinfluss ausgeweitet. Für das Gutverhalten ist neben der Form der Partikel auch der Einfluss der Oberflächentextur relevant. Die weitere Forschung wird sich mit dem Ziel, eine Stoffdatenbank zu erstellen, auf die Datenanalyse und Auswertung konzentrieren.

Literatur

- [1] Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (2012): Land.Technik 2012. Mit Erfahrung und Innovationskraft zu mehr Effizienz. Conference: Agricultural Engineering, Karlsruhe 6. und 7. November 2012; Tagungsband, VDI-Verlag
- [2] Rougier, E.; Munjiza, A.; John, N. (2004): Numerical comparison of some explicit time integration schemes used in DEM, FEM/DEM and molecular dynamics. Int. J. Numer. Meth. Engng. 61, pp. 856–879
- [3] Ropohl, G. (2009): Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik, KIT Scientific Publishing, S. 75 ff.
- [4] Popov, V.L. (2010): Kontaktmechanik und Reibung. Von der Nanotribologie bis zur Erdbebendynamik. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag
- [5] Schäfer, J.; Dippel, S.; Wolf, D. (1996): Force Schemes in Simulations of Granular Materials. Journal de Physique 6(1), pp. 5–20
- [6] Omarov, A.; Aman, S.; Müller, P.; Tomas, J. (2012): Mikromechanische Eigenschaften von Weizenkörnern. Chemie Ingenieur Technik 84(4), S. 535–539
- [7] ASAE S368.4 DEC2000 (2008): Compression Test of Food Materials of Convex Shape
- [8] Mellmann, J. (2001): The transverse motion of solids in rotating cylinders – forms of motion and transition behavior. Powder Technology 118(3), pp. 251–270
- [9] Schulze, D. (2006): Pulver und Schüttgüter. Springer Verlag, S. 176 ff.
- [10] Johnstone, M. (2010): Calibration of DEM models for granular material using bulk physical tests, Dissertation, The University of Edinburgh

Autoren

Dipl.-Ing. Andreas Prüfer ist Projektkoordinator für das Projekt ADALS und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landmaschinentechnik und Regenerative Energien (Leiter: **Prof. Dr.-Ing. Till Meinel**) an der Fachhochschule Köln, Betzdorfer Strasse 2, 50679 Köln, E-Mail: andreas.prufer@fh-koeln.de.

M. Eng. Jörg English war als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Projekt ADALS tätig und arbeitet als Versuchsingenieur bei der Firma AGCO in Marktoberdorf.

B. Eng. Marten Schultze war als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Projekt ADALS tätig und ist derzeit Masterstudent im Maschinenbau an der Fachhochschule Köln.

Hinweise

Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF gefördert (Förderkennzeichen 17N0811) und durch die Firmen Amazonen-Werke H. Dreyer GmbH & Co. KG, Claas Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH, Kverneland Group Soest GmbH, Lemken GmbH & Co. KG und Rauch Landmaschinenfabrik GmbH unterstützt.

 Buch-Tipp



Landschaftspflege mit Schafen

2014, 116 S., 25 €, ISBN 978-3-941583-90-0
(Best.-Nr. 19514)

Für zahlreiche Biotope sind jeweils die Pflegeanforderungen und die produktionstechnischen Bedingungen beschrieben. Die darauf abgestimmten Verfahren der Schafhaltung werden durch Verfahrensabläufe und entsprechende Leistungs-Kostenrechnungen dargestellt; sie bieten eine Grundlage zur Kalkulation einer kostendeckenden Entlohnung.

KTBL
Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft

www.ktbl.de

Kuratorium für Technik und Bauwesen
in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Bartningstr. 49 | 64289 Darmstadt
Tel.: +49 6151 7001-189
Fax: +49 6151 7001-123
E-Mail: vertrieb@ktbl.de