

Christian Korn, Ralf Hübner, Thomas Herlitzius, Frank Rüdiger und Jochen Fröhlich

# Numerische Untersuchung der Luftströmung in der Reinigungseinrichtung von Mähdreschern

Der hohe Gutdurchsatz moderner Mähdrescher und der steigende Anteil an rotierenden Abscheidesystemen führen zu einer erhöhten Belastung der Reinigungseinrichtung. Neben dem mechanischen Anteil hängt der Trennerfolg wesentlich von der pneumatischen Anregung ab. Durch den Einsatz der numerischen Strömungsberechnung (CFD - Computational Fluid Dynamics) wird die Aufteilung des Luftvolumenstromes auf einzelne Funktionselemente (Fallstufen und Siebe) und die Verteilung der Luftgeschwindigkeit entlang der Siebe ermittelt. Für die Analyse des Strömungsfeldes im Prozess ist die Integration einer Gutschicht wesentlich, deren Modellierung Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist und umfassend diskutiert wird. Zusätzlich wird eine Methode zur vereinfachten Abbildung der Lamellensiebe angegeben. Die Berechnungsergebnisse bestätigen die ungünstigen Strömungsverhältnisse bei beladener Reinigung und sollen zukünftig zur Beurteilung der Wirkung konstruktiver Modifikationen herangezogen werden.

## Schlüsselwörter

Reinigungseinrichtung, Mähdrescher, Luftströmung, Simulation, CFD, Gutschicht

## Keywords

Cleaning device, combine harvester, air stream, simulation, CFD, material layer

## Abstract

Korn, Christian; Hübner, Ralf; Herlitzius, Thomas; Rüdiger, Frank and Fröhlich, Jochen

Numerical study of air flow in a combine cleaning shoe

Landtechnik 68(2), 2013, pp. 83–88, 7 figures, 1 table, 12 references

High material throughput of state of the art combine harvesters and raising quantity of non-conventional separation systems lead to an increased load for the cleaning shoe. In addition to the mechanical part, the separation success depends largely on the pneumatic decompaction. Computational fluid

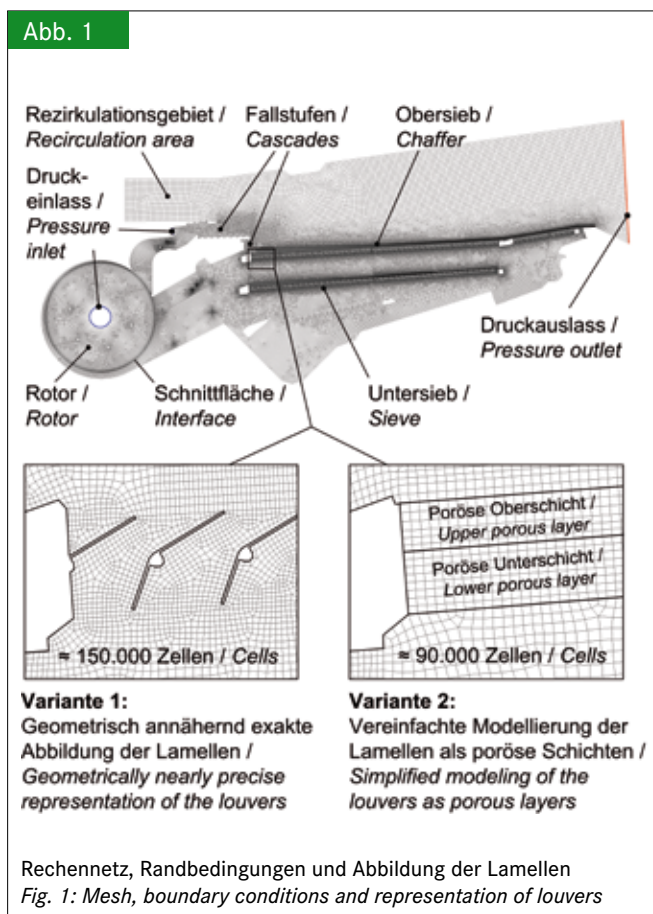
dynamics (CFD) is used to determine the distribution of air volume flow to individual functional elements (cascades and chaffer/sieve) as well as the distribution of air velocity along chaffer and sieve. The methods to include the chaffer and the air flow resistance of material layer are presented and discussed. The computational results confirm the experience of unfavorable flow conditions in case of loaded cleaning shoe and are used to evaluate the effect of design modifications.

Die Mähdrescherreinigung liegt heute noch immer in ihrer konventionellen Bauform vor. Der an den Sieben und Fallstufen benötigte Luftstrom wird durch ein zentrales Gebläse bereitgestellt, auf mehrere Kanäle aufgeteilt und den Funktionselementen zugeführt. Die Strömungsrichtung und -geschwindigkeit innerhalb der Fallstufen, die Verteilung von Geschwindigkeit und Druck entlang des Ober- und Untersiebes sowie die Aufteilung des Volumenstromes auf Ober- und Untersieb sind die wesentlichen pneumatischen Parameter [1-6]. Speziell am Obersieb stellen sich im belasteten (mit Gut beladenen) Zustand ungünstige Strömungsverhältnisse ein. Im vorderen Siebbereich, in dem eine hohe Gutschicht und damit ein hoher Strömungswiderstand vorliegt, sind die Strömungsgeschwindigkeiten häufig zu gering, um eine ausreichende Auflockerung zu erzielen. Dagegen treten im hinteren Siebbereich durch die niedrigere Gutschicht hohe Luftgeschwindigkeiten

auf, wodurch Körner ausgeblasen werden [1]. Eine der Siebeladung angepasste Geschwindigkeitsverteilung kann eine Steigerung der Reinigungsleistung um bis zu 30 % bewirken [2]. Der Einsatz von Strömungsmesstechnik zur Untersuchung der Reinigung im belasteten Zustand ist aufgrund der hohen Beladung der Luft mit Partikeln problematisch. Alternativ zum Experiment kann die numerische Strömungsberechnung zur Ermittlung der Strömungsverhältnisse angewandt werden. Aufgrund der hohen Reproduzierbarkeit, der hervorragenden Visualisierungsmöglichkeiten und des geringen Modifizierungsaufwandes ist die numerische Strömungsmechanik als Entwicklungswerkzeug für die vorliegende Problemstellung geeignet. Einschlägige Untersuchungen beschränken sich bisweilen auf wenige Einzelfälle [7; 8].

### Aufbau der numerischen Modelle

Aufgrund der Komplexität der betrachteten Reinigungseinrichtung und ihrer räumlichen Ausdehnung ist es zweckmäßig, das Lösungsgebiet zur Begrenzung des numerischen Aufwandes zu vereinfachen. Es wird ein 2D-Längsschnitt angefertigt, dessen Schnittbereich die gesamte Reinigungseinrichtung einschließlich des Gebläses umfasst. Das Rechenmodell ist im Maßstab 1:1 zum Original aufgebaut (**Abbildung 1**). Die zu erwartenden starken Änderungen der Strömung im Bereich der Lamellensiebe bedingen eine entsprechende Netzfeinheit. Grundsätzlich erfolgt daher die Erstellung von zwei Rechenmodellen, die sich

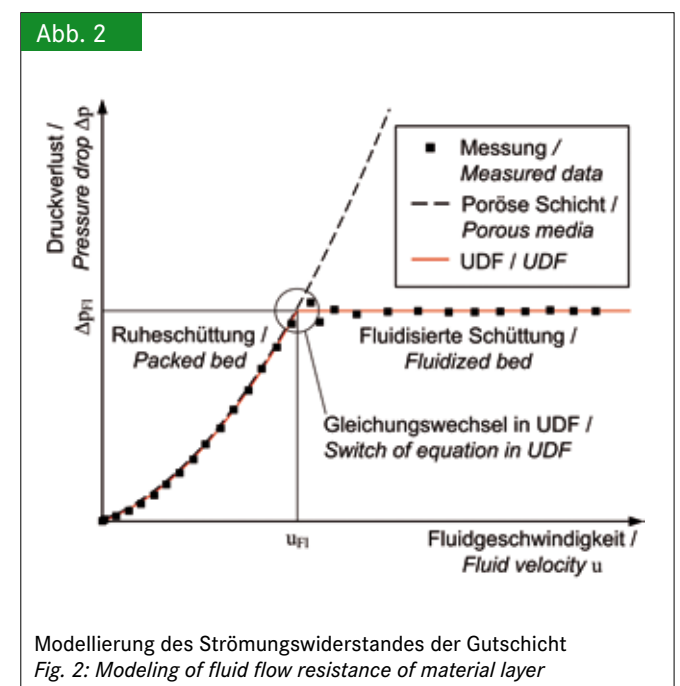


durch die Abbildung der Siebe unterscheiden. Ein Rechenmodell ist durch die geometrisch exakte Abbildung der Lamellensiebe gekennzeichnet, ein weiteres durch die Modellierung des Ober- und Untersiebes als poröse Schicht, wodurch eine erhebliche Anzahl an Gitterzellen eingespart wird.

Zur Berücksichtigung des ungleichen Strömungswiderstandes des Ober- und Unterteils der Lamellen sowie zum Einstellen des Abströmwinkels aus dem Lamellensieb ist die poröse Schicht in zwei Abschnitte geteilt. Diese können einzeln parametrisiert werden.

### Strömungswiderstand der Gutschicht

Es gibt zahlreiche Möglichkeiten, eine Gutschicht bzw. den Einfluss einer Gutschicht auf die Luftströmung in die Berechnung einzubeziehen. Von der Durchführung einer Mehrphasensimulation wird aufgrund des hohen numerischen Aufwandes und der unzureichend validierten bzw. nicht vorhandenen Modelle und Parameter für biogene Partikel vorerst abgesehen. Dagegen stellt die Verwendung der Quellterme in den Impulserhaltungsgleichungen zur Modellierung des Strömungswiderstandes einen guten Kompromiss aus dem Informationsgehalt der Ergebnisse und dem numerischen Aufwand dar. Die Parametrierung kann einerseits mit festen Werten erfolgen, was dem in der Software Ansys Fluent bereits implementierten Modell einer porösen Schicht entspricht. Alternativ kann über eine User Defined Function (UDF) eine Abhängigkeit einzelner Parameter von Strömungsgrößen (z.B. Geschwindigkeit) berücksichtigt werden. **Abbildung 2** verdeutlicht den Zusammenhang zwischen dem Druckverlust und der Fluidgeschwindigkeit für beide Widerstandsmodelle und gibt exemplarisch eine gemessene Fluidisierungskurve einer Weizenschüttung an. Die Fluidisierung einer realen Schüttung ist durch das Auftreten eines Fluidisierungspunktes gekennzeichnet, ab welchem die



Schüttung flüssigkeitsähnliche Eigenschaften aufweist und der Druckverlust über die Schicht bei steigender Strömungsgeschwindigkeit konstant bleibt. Mithilfe einer UDF ist es möglich, den physikalischen Schüttungszuständen entsprechende Gleichungen zuzuweisen und den realen Kurvenverlauf sehr gut anzunähern.

Basis für den quadratischen Anteil beider Modelle ist die Gleichung nach Ergun und Orning [9] (Gleichung 1). Sie ermöglicht die Berechnung des spezifischen Druckverlustes in granularen Haufwerken. Unter Annahme einer isotropen Gutschicht können mittels Koeffizientenvergleich die Eingabeparameter Reibungswiderstandsfaktor  $C_1$  und Trägheitswiderstandsfaktor  $C_2$  für das Berechnungsprogramm ermittelt werden (Tabelle 1). Gleichung 2 ist die Formulierung des Quellterms der Impulserhaltungsgleichung bei Anwendung

einer porösen Schicht in der Software Ansys Fluent. Der lineare (konstante) Anteil der Fluidisierungskurve kann mit Gleichung 3 abgeschätzt werden.

$$\frac{\Delta p}{h'} = k_l \frac{(1 - \varepsilon_K)^2}{d_K^2 \varepsilon_K^3} \rho_l v u_i + k_t \frac{(1 - \varepsilon_K)}{d_K \varepsilon_K^3} \frac{1}{2} \rho_l u_i^2 \quad (\text{Gl. 1})$$

$$s_i = \frac{\partial p}{\partial x_i} = - \left( C_1 \rho_l v u_i + C_2 \frac{1}{2} \rho_l |u| u_i \right) \quad (\text{Gl. 2})$$

$$\frac{\Delta p}{h'} = g(1 - \varepsilon_0)(\rho_s - \rho_l) \quad (\text{Gl. 3})$$

$$\varepsilon_K = \lambda \varepsilon_0 \quad (\text{Gl. 4})$$

Tab. 1

Formelzeichen

Table 1: Nomenclature

Symbol Symbol	Erläuterung Description	Einheit Unit
$C_1$	Reibungswiderstandsfaktor Viscous resistance factor	$\text{m}^{-2}$
$C_2$	Trägheitswiderstandsfaktor Inertial resistance factor	$\text{m}^{-1}$
$d_K$	Korndurchmesser Grain diameter	$\text{m}$
$g$	Gravitation Gravity	$\text{m s}^{-2}$
$h'$	Strömungsweg Flow distance	$\text{m}$
$k_l$	Laminarkonstante Laminar constant	-
$k_t$	Turbulenzkonstante Turbulence constant	-
$p$	Druck Pressure	$\text{N m}^{-2}$
$s_i$	Quellterm Source term	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-2}$
$u_i$	i-te Komponente der Geschwindigkeit i-th velocity component	$\text{m s}^{-1}$
$u_l$	Luftgeschwindigkeit Air velocity	$\text{m s}^{-1}$
$x_i$	i-te Koordinate i-th coordinate	$\text{m}$
$\varepsilon$	Spezifisches Hohlraumvolumen Specific void fraction	-
$\lambda$	Auflockerungsfaktor Decompaction factor	-
$\rho_l$	Luftdichte Air density	$\text{kg m}^{-3}$
$\rho_s$	Stoffdichte Material density	$\text{kg m}^{-3}$
$\nu$	Kinematische Viskosität Kinematic viscosity	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$

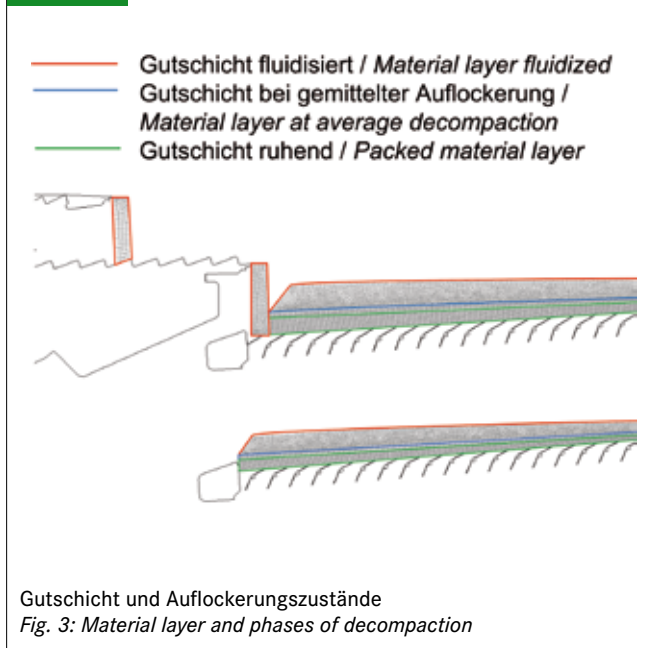
Der Gültigkeitsbereich von Gleichung 1 ist auf ruhende Gutschichten aus reinem Korn begrenzt, weshalb die Parametrierung des spezifischen Hohlraumvolumens  $\varepsilon_K$  auf das im Mährescher vorliegende, periodisch aufgelockerte Reinigungsgemisch erweitert werden muss. Dazu kann nach Hübner [10] und Freye [1] das Auflockerungsverhältnis  $\lambda$  verwendet werden, wobei  $\varepsilon_0$  das spezifische Hohlraumvolumen im Ruhezustand beschreibt (Gleichung 4). Das Auflockerungsverhältnis  $\lambda$  ist eine stetige, sich durch die Schwingbewegung der Siebe periodisch ändernde Größe und abhängig vom Wert der pneumatischen und mechanischen Anregung. In den nachfolgend beschriebenen numerischen Untersuchungen werden zwei wesentliche Vereinfachungen getroffen:

- Die instationäre Gutauflockerung wird nicht direkt abgebildet. Stattdessen werden der numerischen Analyse drei charakteristische Auflockerungszustände zugrunde gelegt. Mithilfe der Berechnungsergebnisse für eine ruhende Gutschicht, eine Gutschicht mit zeitlich gemittelter Auflockerung und eine vollständig fluidisierte Gutschicht ist eine aussagekräftige Beurteilung der Strömungsverhältnisse möglich.

- Lehmann [11] bestätigte experimentell, dass der Strömungswiderstand der Gutschicht vom Kornanteil  $K_{KA}$  abhängt. Bei gleicher Gutschichthöhe bewirken Reinigungsgemische mit hohem Kornanteil einen höheren Strömungswiderstand als solche mit geringeren Kornanteilen. Für die Simulation hat dies zur Folge, dass die Parametrierung auf vom Kornanteil abhängigen Guteigenschaften basieren müsste. Da das zur Ermittlung der Gutauflockerung verwendete Bewegungsmodell auf einer Gutschicht aus reinem Korn basiert, erscheint es zweckmäßig, auf die Erhöhung der Komplexität des Modells und der Parametrierung zu verzichten und in der Berechnung eine Gutschicht aus reinem Korn zugrunde zu legen. Die Gutschicht kann somit einheitlich parametrieren werden, wobei die Nicht-Kornbestandteile (NKB) bezüglich ihrer Masse zur Gutschicht addiert werden.

Die Gutschicht wird geometrisch über die Definition separater Netzzonen oberhalb der Siebe in das Berechnungsmodell

Abb. 3



integriert. Die Quellterme der Impulserhaltungsgleichungen der dazugehörigen Netzzellen können mit entsprechenden Widerstandsmodellen belegt werden. Die Beschreibung des Gutschicht Höhenverlaufs erfolgt über die Restkornfunktion nach Schreiber [12]. **Abbildung 3** stellt die Ausdehnung der Gutschicht durch die mechanische und pneumatische Auflockerung für die angesprochenen charakteristischen Auflockerungszustände dar.

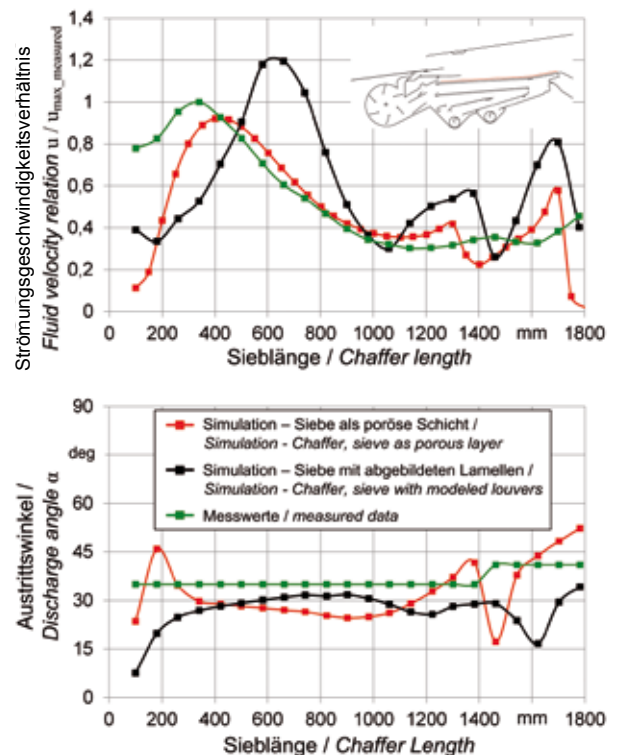
### Lösung

Da im Lösungsgebiet die Machzahl  $Ma = 0,3$  nicht überschritten wird, kann das Fluid näherungsweise als inkompressibel betrachtet werden. Basis der Lösung sind die RANS-Gleichungen (RANS: Reynolds Averaged Navier Stokes) für die gemittelte turbulente Strömung. Als Turbulenzmodell wird das RNG-k- $\epsilon$ -Modell (RNG: Renormalisierungsgruppen) gewählt. Diese Erweiterung besitzt gegenüber dem Standard k- $\epsilon$ -Modells Vorteile bei komplexen Strömungen, dem Auftreten von Ablösegebieten und bei Wirbelbildungen. Die räumliche Diskretisierung der Strömungsgrößen erfolgt durch ein Aufwind-Verfahren 2. Ordnung, die zeitliche Diskretisierung ist implizit und ebenfalls 2. Ordnung.

### Ergebnisse

Die Untersuchung der Reinigung im unbeladenen Zustand bestätigt die Eignung der Modellierung der Siebe als poröse Schicht. Geeignete Widerstandsparametrierungen für die in **Abbildung 1** dargestellte Ober- und Unterschicht konnten mithilfe einer Parameteranalyse auf Basis des Abgleichs der Geschwindigkeitsverteilung mit Messwerten gefunden werden. Im Hinblick auf eine mit vertretbarem Aufwand durchführbare 3D-Simulation der gesamten Reinigung gibt es derzeit keine Alternative zur Modellierung der Siebe als poröse Schicht.

Abb. 4



Oben: Auf den Maximalwert der Messung normierte Darstellung der absoluten Strömungsgeschwindigkeit. Unten: Austrittswinkel. Beide: Längsverteilung entlang des unbeladenen Obersiebes  
 Fig. 4 Top: To maximum value of measured data normalized absolute fluid velocity. Bottom: Discharge angle. Both: Longitudinal distribution along unloaded chaffer

Durch die gewählte Parametrierung kann die Kurve, vor allem im mittleren Siebbereich, sehr gut an das Experiment angenähert werden (**Abbildung 4**). Das lokale Minimum im hinteren Abschnitt der Kurven ist auf den Verbindungsbereich von Obersieb und Obersiebverlängerung zurückzuführen, welcher nicht durchströmt werden kann.

Die Berechnung mit geometrisch abgebildeten Lamellen zeigt eine Abweichung der Geschwindigkeitsverteilung hinsichtlich Betrag und Lage der Maxima gegenüber dem Experiment. Dies ist mit dem Übergang von der realen, dreidimensionalen Geometrie auf einen zweidimensionalen Längsschnitt zu begründen. Reibungs- und trägheitsbedingte Verluste durch den seitlichen Einlass des Gebläses und die sich anschließende Umlenkung des Luftstromes in der realen Geometrie werden in der zweidimensionalen Betrachtungsweise vernachlässigt und führen zu einem zu groß berechneten Volumenstrom. Die Verlagerung der Maxima ist ebenfalls auf die Vernachlässigung der dritten Dimension zurückzuführen. Die fingerartige Gestaltung der Lamellen in der Realität führt zur Ausbildung von Scherströmungen und dreidimensionalen Wirbelstrukturen, wodurch insgesamt mehr kinetische Energie dissipiert wird als in der zweidimensionalen Simulation. Der höhere Strömungswiderstand bei der realen Siebdurchströmung führt zu einer

Abb. 5

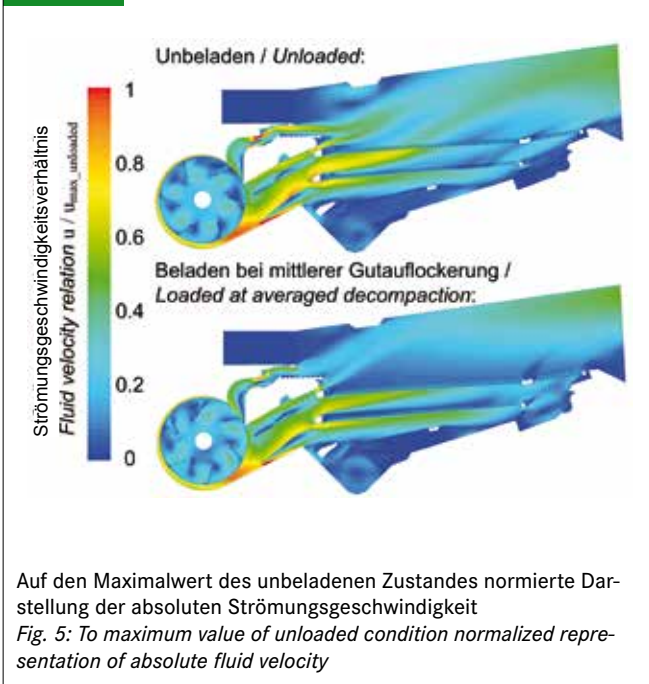
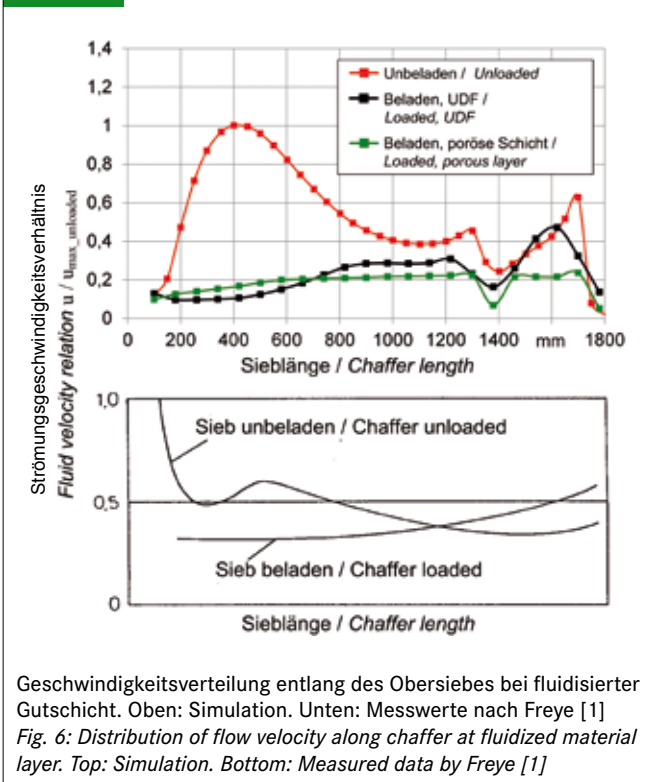


Abb. 6



Vergleichmäßigung des Strömungsprofils, wie in **Abbildung 4** anhand der Messwerte ersichtlich ist. Eine im Projekt durchgeführte Detailuntersuchung der Lamellendurchströmung hat die getroffenen Aussagen bestätigt.

Das Berechnungsergebnis im beladenen Zustand der Siebe zeigt ein signifikant vom unbeladenen Zustand abweichendes Strömungsfeld (**Abbildung 5** und **6**).

Abb. 7



Durch den Strömungswiderstand der Gutschicht erfolgt eine erhebliche Vergleichmäßigung der Strömungsgeschwindigkeit entlang der Siebe, jedoch mit höheren Werten am Siebende. Dieser Zustand wirkt sich negativ auf die Leistungsfähigkeit der Reinigungseinrichtung aus und spiegelt die Erfahrungen aus der Praxis und die Angaben aus anderen Untersuchungen [1-6] wider (**Abbildung 6**). Die Unterschiede in der Modellierung des Strömungswiderstandes der Gutschicht wirken sich am deutlichsten im hinteren Siebabschnitt auf das Berechnungsergebnis aus. Hier ist die Strömungsgeschwindigkeit bei Anwendung einer UDF wesentlich größer, was auf den konstanten und damit, im Gegensatz zu porösen Schichten, niedrigeren Strömungswiderstand nach Überschreiten des virtuellen Fluidisierungspunktes zurückzuführen ist.

Eine zum Siebende hin abnehmende Strömungsgeschwindigkeit könnte die Leistungsfähigkeit der Reinigungseinrichtung nach [3] positiv beeinflussen. Aufbauend auf den Ergebnissen der Simulation gilt es nun, konstruktive Änderungen zur Verbesserung der Luftverteilung vorzunehmen und deren Wirkung mithilfe der vorgestellten Modelle zu bewerten und experimentell zu bestätigen.

### Validierung

Die Validierung des numerischen Modells erfolgt durch experimentelle Untersuchungen. Es wird dazu eine Messanordnung mit fünf Anemometern nach **Abbildung 7** verwendet, welche entlang der Siebe geführt wird und die Strömungsgeschwindigkeit an definierten Punkten auf der gesamten Siebfläche erfasst. Um dieses zweidimensionale Profil den Ergebnissen der Simulation gegenüberstellen zu können, erfolgt eine Mittelung der Messwerte über die Siebbreite. Der vorgestellte Messaufbau ist jedoch nur für Messungen im unbeladenen Zustand geeignet. Über ein nicht-invasives Messverfahren soll zukünftig die Aufnahme des Strömungsprofils im beladenen Zustand erfolgen, sodass die Modelle für den Strömungswiderstand der Gutschicht bewertet werden können.

### Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen haben die Zweckmäßigkeit des Einsatzes der numerischen Strömungsberechnung als Entwicklungswerkzeug für die vorliegende Problemstellung bestätigt. Durch die Vereinfachung des Lösungsgebietes auf einen 2D-Längsschnitt und den Einsatz eines Modells für den Strömungswiderstand der Gutschicht ist die Berechnungsdauer für praktische Belange akzeptabel. Im Hinblick auf eine dreidimensionale Berechnung der Reinigungseinrichtung wird eine Möglichkeit zur Abstraktion der Lamellensiebe gegeben. Für den belasteten Zustand zeigt die Simulation einen ungünstigen steigenden Geschwindigkeitsverlauf. Die Wirkung konstruktiver Modifikationen zur Verbesserung des Strömungsprofils sollen zukünftig mithilfe der numerischen Strömungsberechnung vorhergesagt und im Experiment nachgewiesen werden.

### Literatur

- [1] Freye, T. (1980): Untersuchungen zur Trennung von Korn-Spreu-Gemischen durch die Reinigungsanlage des Mähdeschers. Dissertation, Universität Hohenheim, MEG Forschungsbericht 47
- [2] Dahany, A. (1994): Verbesserung der Leistungsfähigkeit luftdurchströmter Schwingsiebe bei der Korn-Spreu-Trennung im Mähdescher durch Optimierung der Luftverteilung. Dissertation, Universität Hohenheim, MEG Forschungsbericht 245
- [3] Zhao, Y. (2002): Einfluss mechanischer und pneumatischer Parameter auf die Leistungsfähigkeit von Reinigungsanlagen im Mähdescher. Dissertation, Universität Hohenheim, VDI/MEG Forschungsbericht Agrartechnik 387
- [4] Regge, G. und Manig, G. (1977): Zur Sichtwirkung der Luftströmung in der Fallstufe der Mähdescherreinigung. *Wiss. Z. TU Dresden* 26(6), S. 1129-1131
- [5] Reumschüssel, G.; Zehme, C. (1973): Untersuchungen am Obersieb einer ebenen Reinigungseinrichtung. *agrartechnik* 23, S. 280-283
- [6] Persson, S. (1957): Die Windströmung in der Reinigung eines Mähdeschers. *Landtechnische Forschung* 7(4), S. 113-116
- [7] Gebrehiwot, M.G.; De Baerdemaeker, J.; Baelmans, M. (2009): Computational and experimental study of a cross-flow fan for combine cleaning shoes. *Proceedings of VDI-MEG conference of agricultural engineering* issue No. 2060, 67th conference LAND.technik - AgEng 2009, VDI, 6.-7.11.2009, Hannover, pp. 387-392
- [8] Kenney, K.L.; Wright, C.T.; Bryden, K.M. (2005): Virtual Engineering Approach to Developing Selective Harvest Technologies. *ASAE Annual Meeting*, Tampa, Paper Nr. 056046
- [9] Ergun, S.; Orning, A. A. (1949): Fluid Flow through randomly packed columns and fluidized beds. *Ind. Eng. Chem.* 41(6), pp. 1179-1184
- [10] Hübner, R. (1999): Entwicklung eines Modells zur Auslegung einer rotierenden Reinigungseinrichtung im Mähdescher. Dissertation, TU Dresden
- [11] Lehmann, H.G. (1970): Bestimmung des Druckverlustes an einer Schüttung aus Korn, Stroh und Spreu in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit. *Ingenieurbeleg*, TU Dresden, unveröffentlicht
- [12] Schreiber, M.; Kutzbach, H.D. (2003): Modellierung des Abscheideverhaltens von Mähdescher-Reinigungsanlagen. *Landtechnik* 58(4), S. 236-237

### Autoren

**Dipl.-Ing. Christian Korn** und **Dr.-Ing. Ralf Hübner** sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für Verarbeitungsmaschinen und mobile Arbeitsmaschinen der Technischen Universität Dresden, Professur für Agrarsystemtechnik (Leitung **Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Herlitzius**), Bergstr. 120, 01062 Dresden, E-Mail: korn@ast.mw.tu-dresden.de

**Dr.-Ing. Frank Rüdiger** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Strömungsmechanik, Professur für Strömungsmechanik (Leitung **Prof. Dr.-Ing. habil. Jochen Fröhlich**), George-Bähr-Straße 3c, 01062 Dresden

### Danksagung

Wir danken der Professur für Strömungsmechanik der Technischen Universität Dresden für die fachliche Unterstützung und die hervorragende Zusammenarbeit.