

# Einfluss elliptischer Siebbewegungen auf die Arbeitsweise der Mähdrescherreinigungsanlage

Konstantin Beckmann, Joachim Pförtner, Stefan Böttinger

Die Durchsatzsteigerung der Reinigungsanlage im Mähdrescher setzt eine Verbesserung des Trennprozesses und damit eine Optimierung der pneumatischen und mechanischen Anregung voraus. Eine Möglichkeit der Verbesserung der Arbeitsweise ist die Optimierung der von den Sieben ausgeführten Bewegungsformen. Dazu wurde der am Institut vorhandene Reinigungsprüfstand um einen Antrieb erweitert, mit dem es möglich ist, lineare, kreisförmige und elliptische Siebbewegungen zu untersuchen. Durch die Auswertung der durchgeführten Versuche kann die Arbeitsweise der Reinigungsanlage bewertet werden. Parallel durchgeführte Simulationen nach der diskreten Elementen Methode mit gekoppelter Strömungssimulation (DEM-CFD-Simulationen) ermöglichen eine Untersuchung des Bewegungsverhaltens der Körner sowie der Nichtkornbestandteile (NKB) und somit eine detaillierte Betrachtung der Teilprozesse.

## Schlüsselwörter:

Reinigungsanlage, Mähdrescher, Siebbewegung, Entmischung, Abscheidung, DEM, CFD, Simulation

Die Forderung der Leistungssteigerung moderner Mähdrescher bedingt die Weiterentwicklung der verfahrenstechnischen Baugruppen Dreschwerk, Restkornabscheidung und Reinigungsanlage. Durch die hohen Durchsätze und die intensive Strohbehandlung der vorgeschalteten Baugruppen wird speziell die Reinigung im starken Maße belastet (ROTHAUG und KUTZBACH 2005). Um eine Verbesserung der Trennung von Korn und NKB zu erreichen, wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Untersuchungen durchgeführt (BÖTTINGER 1993, FREYE 1980, DAHANY 1994, ZHAO 2002, ZEHME 2006). Eine Möglichkeit ist dabei die Anregungsform des Siebes zu optimieren. In Mähdreschern führen die Siebe eine annähernd lineare in Förderrichtung aufwärts gerichtete Schwingung aus. Bei einem sich kreisförmig bewegenden Sieb konnte eine, im Vergleich zum linearschwingenden Sieb, geringere Durchsatzempfindlichkeit beobachtet werden. Jedoch liegt das Verlustniveau geringfügig höher (ROTHAUG et al. 2006, YIN et al. 2001). Eine Möglichkeit die Vorteile der jeweiligen Siebbewegungen zu kombinieren, besteht in der elliptischen Siebbewegung, da diese als Kombination aus linearer und kreisförmiger Bewegungsform zu sehen ist. Im Vergleich zur kreisförmigen Siebbewegung können bei der elliptischen Siebbewegung unterschiedliche Beschleunigungswerte in x- und y-Richtung, also in Siebrichtung bzw. normal zum Sieb, erreicht werden. Dieser zusätzliche Freiheitsgrad ermöglicht eine höhere Flexibilität, die sich positiv auf den Entmischungs- und Abscheidungsprozess auswirken kann. So wurde bei Laboruntersuchungen elliptischer Bewegungsformen auf dem Hordenschüttler eine Durchsatzsteigerung von 10–15 % bei 1 % Kornverlust nachgewiesen. Jedoch wurde ebenfalls ein höherer Leistungsbedarf festgestellt, der bezogen auf die gesamte Motorleistung des Mähdreschers immer noch vernachlässigbar gering ist (BERNHARDT 2015).

Im Folgenden werden experimentelle Untersuchungen elliptischer Siebbewegungen in der Mäh-drescherreinigungsanlage vorgestellt. Ein Vergleich zu linearen und kreisförmigen Bewegungsformen erlaubt eine entsprechende Analyse und Bewertung. Des Weiteren werden Ergebnisse von Simulationen erläutert und die Genauigkeit der Simulation bewertet. Auf Basis dieser Untersuchungen kann das tatsächliche Potenzial der elliptischen Siebbewegung ermittelt werden. Falls eine signifikante Verbesserung der Arbeitsweise erkennbar ist, können weitere Untersuchungen am Prüfstand durchgeführt werden. Danach sind Felduntersuchungen mit einem Mähdrescher, dessen Siebantrieb auf elliptische Siebanregungen umgebaut ist, denkbar.

### Theoretische Vorbetrachtung

Durch die lineare Siebbewegung wird eine wurfweise Förderung des Gutgemisches erreicht, die eine Entmischung und Abscheidung des Erntegutes durch das Sieb ermöglicht. Zur Charakterisierung der mechanischen Anregung wird häufig die Wurfkennzahl  $Fr$  verwendet. Diese beschreibt die maximale Beschleunigung des Gutgemisches normal zum Sieb bezogen auf die entsprechende Komponente der Erdbeschleunigung  $g$  und beinhaltet die Amplitude  $a$ , die Frequenz  $f$  des Siebes, die Siebneigung  $\alpha$  und den Schwingungsrichtungswinkel  $\beta$  (FREYE 1980).

$$Fr = \frac{a \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot \sin(\beta - \alpha)}{g \cdot \cos(\alpha)} \tag{Gl. 1}$$

Im Gegensatz zur linearen Siebbewegung, in der das Gutgemisch in Schwingungsrichtung gefördert wird, ist bei der kreisförmigen Anregung die Gutbewegung bei Ablösung stets tangential zur kreisförmigen Bewegungsbahn. Der Ablösewinkel  $\varphi$  beschreibt dabei den Punkt der Ablösung des Gutgemisches vom Sieb und hängt von der Wurfkennzahl ab (Abbildung 1). Höhere Wurfkennzahlen bewirken eine frühere Ablösung und somit einen größeren Schwingungsrichtungswinkel  $\beta$ .

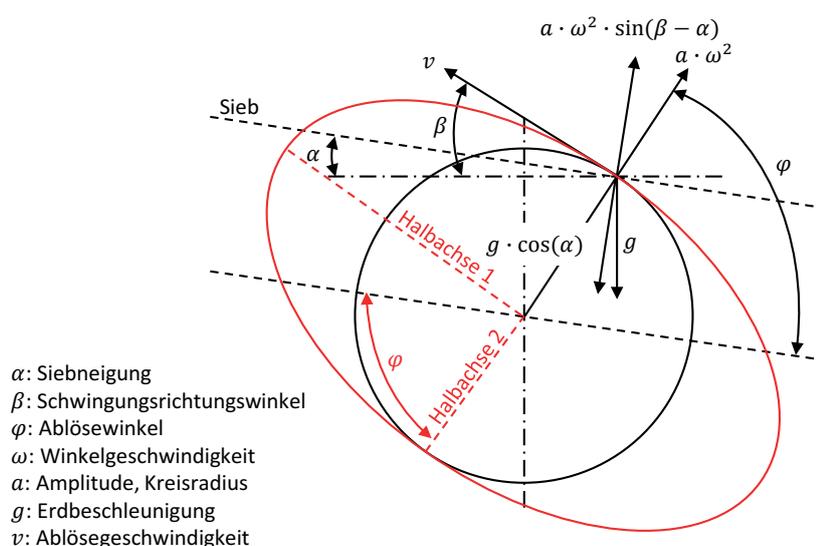


Abbildung 1: Abhängigkeit der Wurfkennzahl auf den Ablösewinkel des Gutgemisches auf einem sich kreisförmig bewegenden Sieb (ROTHAUG et al. 2003)

Dies bedeutet einen größeren Anteil der Beschleunigung normal zum Sieb, was direkt den Förder- und Entmischungsprozess beeinflusst. Bei einer elliptischen Siebbewegung ist der Schwingungsrichtungswinkel von der Drehung der Ellipsenbahn und somit von dem Winkel zwischen Siebboden und zweiter Halbachse abhängig. In Abbildung 1 ist die rot dargestellte elliptische Kurvenbahn so gewählt, dass der Punkt der Ablösung mit dem der kreisförmigen Siebbewegung übereinstimmt.

Bei der kreisförmigen Siebbewegung sind die maximalen Beschleunigungen in x- und y-Richtung gleich groß. Wobei angenommen wird, dass die Beschleunigungen in x-Richtung hauptsächlich die Förderung charakterisieren und Verschiebungen innerhalb des Haufwerks hervorrufen, während die Beschleunigungen in y-Richtung die Kräfte in Abscheiderichtung definieren (BERNHARDT 2015, DAMM 1972). Gleiche Beschleunigungswerte in x- und y-Richtung müssen für die Arbeitsweise der Reinigung nicht optimal sein. Mithilfe elliptischer Siebbewegungen können die Beträge der maximalen Beschleunigungen unabhängig voneinander variiert werden. Mit diesem zusätzlichen Freiheitsgrad kann Einfluss auf die Entmischung und Abscheidung genommen werden (BERNHARDT 2015).

### Prüfstand zur Untersuchung verschiedener Siebbewegungen

Zur Untersuchung der elliptischen Siebbewegung wurde der am Institut für Agrartechnik vorhandenen Mähdrescherreinigungsprüfstand um einen Antrieb erweitert, der die Ausführung von linearen, kreisförmigen und elliptischen Siebbewegungen mit unterschiedlichen Parametern erlaubt. Zur Reduzierung der Menge an Versuchsgut beträgt die Wirkbreite 0,23 m. Außerdem besitzt der Prüfstand, im Gegensatz zur Reinigungsanlage aktueller Mähdrescher, lediglich ein luftdurchströmtes Sieb. Die Luftgeschwindigkeit kann dabei abschnittsweise individuell eingestellt werden. So ist es möglich, Teilprozesse separat voneinander besser zu analysieren. Der Grundaufbau ist in Abbildung 2 zu sehen (MEYER 2015).

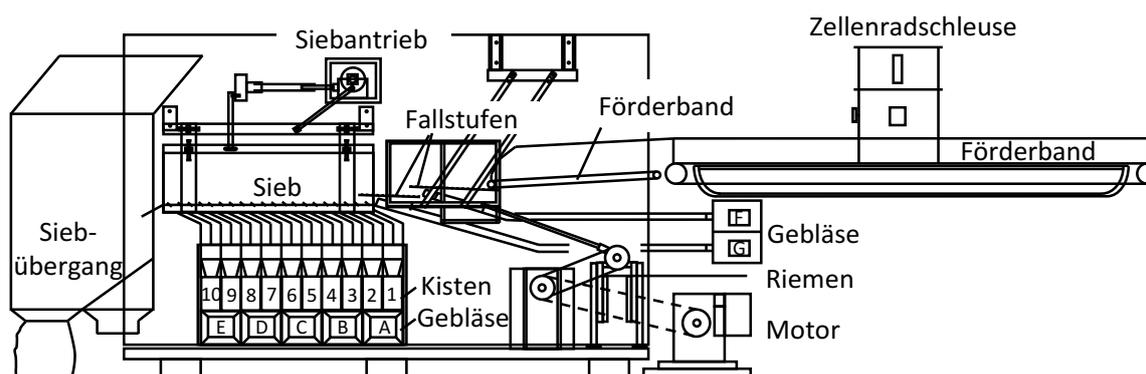


Abbildung 2: Mähdrescherreinigungsprüfstand zur Untersuchung linearer, kreisförmiger und elliptischer Siebbewegungen (BECKMANN et al. 2016)

Zur Bereitstellung des Versuchsgutes wird ein 10 m langes Förderband vor Versuchsbeginn gleichmäßig mit NKB belegt. Mit einer Bandgeschwindigkeit von 0,5 m/s und der daraus resultierenden Versuchsdauer von 20 s können die instationären Füllungs- und Leerungsphase vernachlässigt werden, da deren Anteil relativ gering ist (ZHAO 2002). Während des Versuches wird Korn mittels einer Zellenradschleuse auf das NKB dosiert. Die Einstellung des Durchsatzes erfolgt über die auf das

Förderband aufgelegte Menge NKB und die Drehzahl der Zellenradschleuse. Das Versuchsgut wird mithilfe eines weiteren Förderbandes zu dem Vorbereitungsboden des Reinigungsprüfstandes gefördert. Der Vorbereitungsboden wird mit einem separaten Motor über Riemen angetrieben und führt eine annähernd lineare Schwingung aus. Über den Vorbereitungsboden und zwei luftdurchströmten Fallstufen gelangt das Versuchsgut auf das luftdurchströmte Sieb, welches die unterschiedlichen Bewegungsformen ausführen kann. Durch die Förder-, Entmischungs- und Abscheideprozesse wird das Versuchsgut durch das Sieb in die Kisten 1-10 abgeschieden oder über das Sieb hinweg ausgetragen. Durch die anschließende Auswertung ist es möglich, die Kornverluste  $V_{Korn}$ , die Reinheit  $R_{Korn}$ , die Abscheidelänge  $l_{80}$  sowie die Kornabscheiderate  $A_{Korn}$  zu bestimmen. Die Bewertung der Arbeitsweise erfolgt im Folgenden hauptsächlich anhand der Kornverluste. Diese definieren sich aus dem Quotienten der nicht abgeschiedenen Körner  $m_{Korn,Verl}$  bezogen auf die Gesamtkornmasse  $m_{Korn,Ges}$

$$V_{Korn} = \frac{m_{Korn,Verl}}{m_{Korn,Ges}} \cdot 100 \% \quad (Gl. 2)$$

Die Reinheit ist ein Maß für den Anteil an Verunreinigungen in der abgeschiedenen Gutmasse. Sie bezeichnet das Verhältnis der abgeschiedenen Kornmasse  $m_{Korn,Ra}$  zur gesamten abgeschiedenen Masse  $m_{Ges,Ra}$ , wobei sich die gesamte abgeschiedene Masse aus der abgeschiedenen Kornmasse  $m_{Korn,Ra}$  und der abgeschiedenen NKB-Masse  $m_{NKB,Ra}$  definiert.

$$R_{Korn} = \frac{m_{Korn,Ra}}{m_{Korn,Ra} + m_{NKB,Ra}} = \frac{m_{Korn,Ra}}{m_{Ges,Ra}} \quad (Gl. 3)$$

Die Abscheidelänge beschreibt die Sieblänge nach der 80 % der aufgelegten Kornmasse abgeschieden ist. Die Abscheiderate gibt die prozentuale Abscheidung über der Sieblänge an. Gebläse A-E leiten Luft durch das Sieb in die Gutschicht, Gebläse F-G in die Fallstufen. Für die jeweiligen Siebbereiche kann die Luftgeschwindigkeit durch eine Gebläsedrosselung eingestellt werden.

Die Realisierung unterschiedlicher Siebbewegungen erfolgt durch eine überlagerte horizontale und vertikale Schwingung. Dazu ist der Hauptrahmen, welcher fest mit dem Prüfstandsfundament verbunden ist, über Linearführungen mit einem vertikal schwingenden Rahmen verbunden. In dem vertikal schwingenden Rahmen ist ein horizontal schwingender Rahmen installiert, in dem das Sieb befestigt ist. Durch diese Anordnung ist eine unabhängige horizontale und vertikale Siebschwingung möglich. Der Antrieb besteht aus einem Elektromotor und aus zwei Kurbeltrieben, die über ein Verteilergetriebe und eine Lamellenkupplung miteinander verbunden sind, Abbildung 3 (MEYER 2015).

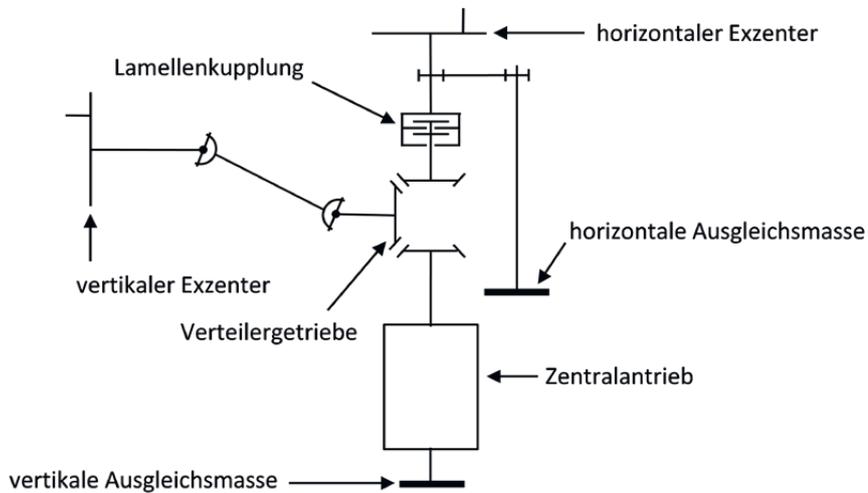


Abbildung 3: Antrieb des Reinigungsprüfstandes (MEYER 2015)

Durch die Verbindung der Kurbeltriebe mit den jeweiligen Rahmen ist eine sinusförmig oszillierende Bewegung möglich. Die Amplituden sind dabei stufenlos verstellbar. Das Verteilergetriebe hat ein Übersetzungsverhältnis von 1 : 1, sodass die Frequenz der Kurbeltriebe direkt über die Drehzahl des Elektromotors eingestellt werden kann. Die Lamellenkupplung erlaubt eine Einstellung des Phasenwinkels der beiden Kurbeltriebe zueinander und somit die Einstellung der Bewegungsform (Abbildung 4).

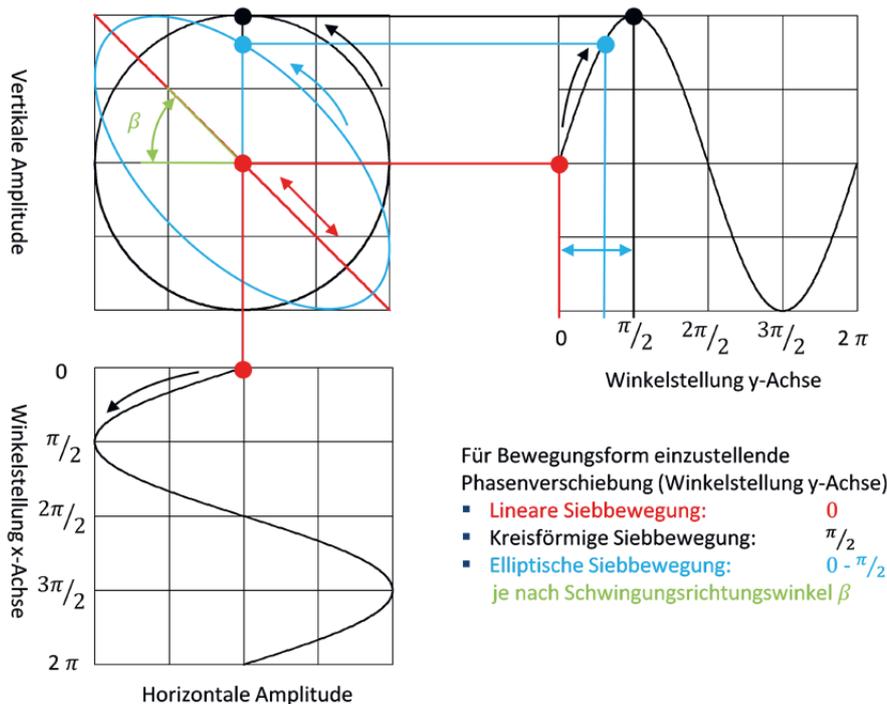


Abbildung 4: Einstellung der linearen (rot), kreisförmigen (schwarz) und elliptischen (blau) Siebbewegung anhand des Phasenwinkels, Winkelstellung x- und y-Achse im Bogenmaß

Zur Ausführung einer linearen Siebschwingung wird je nach gewünschtem Schwingungswinkel und gewünschter Schwingungsamplitude die Amplituden der Kurbeltriebe für den horizontalen und für den vertikalen Rahmen sowie der Phasenwinkel auf  $0^\circ$  eingestellt. Durch die sinusförmige Bewegung der Rahmen führt das Sieb eine resultierende Linearschwingung aus. Die Realisierung kreisförmiger Siebbewegungen erfolgt durch einen Phasenwinkel von  $90^\circ$  und durch eine Anpassung der vertikalen und horizontalen Amplitude auf den gleichen Wert, der den Radius der Kreisbahn definiert. Elliptische Siebbewegungen werden je nach gewünschtem Schwingungswinkel  $\beta$  der Ellipse bei einem Phasenwinkel von  $0$  bis  $90^\circ$  erreicht. Durch diese Anordnung ist es möglich, den Einfluss der Bewegungsform auf die Arbeitsweise der Mährescherreinigungsanlage detailliert zu untersuchen.

### Versuchsplanung

Zur Reduzierung der Anzahl der Versuche wurde neben der Bewegungsform im ersten Schritt lediglich der Durchsatz variiert. Die konstanten Parameter der Luftgeschwindigkeit, der mechanischen Anregung des Vorbereitungsbodens sowie der Siebneigung wurden in Anlehnung an ausgewählte Referenzversuche der linearen und kreisförmigen Siebbewegung aus der Literatur (ZHAO 2002, ROTH AUG et al. 2006) festgelegt. Das Korn-NKB-Massenverhältnis beträgt bei den Versuchen aus der Literatur 70:30 (Korn:NKB). Wegen der unterschiedlichen Stoffeigenschaften des aktuellen Versuchsgutes ist das Korn-NKB-Massenverhältnis auf 75:25 (Korn:NKB) geändert worden. Des Weiteren wurde, um die Stoffeigenschaften durch die wiederholte Verwendung des Versuchsgutes nicht zu verändern, für jeden Versuch 33 % des Versuchsgutes durch Unbenutztes ersetzt. Eine Übersicht der Versuchsparmeter zeigt Tabelle 1. Neben Versuchen mit linearen und kreisförmigen Siebbewegungen, um die Arbeitsweise des Prüfstandes nach Umbau des Antriebes zu analysieren, erfolgte eine detaillierte Untersuchung elliptischer Siebbewegungen und deren Einfluss auf die Arbeitsweise der Mährescherreinigungsanlage. Um mit einer möglichst geringen Anzahl an Versuchen den Parametersatz zu ermitteln, bei dem die Kornverluste gering sind, wurde im ersten Schritt ein teilfaktorieller Versuchsplan mithilfe der Software Cornerstone von camLine aufgestellt. Durch eine statistische Regression über die Ergebnisse der durchgeführten Versuche ist es möglich, Aussagen über nicht messtechnisch untersuchte Parametersätze zu treffen. Dabei wurde ein quadratischer Regressionsansatz gewählt, da die Kornverlust-Durchsatz-Kennlinien sowie die Reinheit-Durchsatz-Kennlinien bestmöglich durch quadratische Funktionen abgebildet werden können. Durch die Ausführung eines statistischen Versuchsplans konnte die Anzahl der durchgeführten Versuche auf 31 reduziert werden. Aufgrund der statistischen Regression liegen die Aussagen immer in einem Wahrscheinlichkeitsbereich. Um belastbarere Ergebnisse zu erhalten, wurde im Bereich geringer Kornverluste ein vollfaktorieller Versuchsplan nachgeschaltet.

Tabelle 1: Versuchsparameter

Versuchsparameter	Bewegungsform		
	1. Linear	2. Kreis	3. Ellipse
Schwingungsamplitude	30 mm		
Schwingungswinkel	34°		
Kreisdurchmesser		40 mm	
Horizontale Amplitude			10–30 mm
Vertikale Amplitude			10–30 mm
Phasenverschiebung			0–90°
Spezifischer Korndurchsatz		1–5 kg/(s·m)	
Frequenz		4 Hz	
Sieböffnung (Lamelle)		10 mm	
Luftgeschwindigkeit Fallstufen (FS)		1. FS: 5 m/s 2. FS: 5 m/s	
Luftgeschwindigkeit Sieb		im Bereich von Kiste 1 bis 4: 4,5 m/s im Bereich von Kiste 5 bis 6: 3 m/s im Bereich von Kiste 7 bis 10: 2 m/s	
Strömungsrichtung		30°	
Siebneigung		1°	
Massenverhältnis		Korn 75 % : NKB 25 %	
Versuchsgut		Weizen	

## Ergebnisse

Die Kornverluste bei linearer und kreisförmiger Siebbewegung zeigen qualitativ den gleichen Verlauf wie die von bereits durchgeführten Versuchen aus der Literatur (ZHAO 2002, ROTHaug et al. 2006). Quantitativ liegen die Kornverluste geringfügig höher, was auf Unterschiede in den Stoffeigenschaften des Versuchsgutes zurückzuführen ist. Somit ist der Prüfstand zur Untersuchung der elliptischen Siebbewegung geeignet (BECKMANN et al. 2016).

Mithilfe der Versuche aus dem teilfaktoriellen Versuchsplan und der durchgeführten Regressionsanalyse ist eine Analyse des Einflusses der horizontalen Amplitude  $a_h$ , der vertikalen Amplitude  $a_v$  und des Schwingungsrichtungswinkels  $\beta$  möglich (Abbildung 5). Die Interpolationsparameter sowie das korrigierte Bestimmtheitsmaß für die Abbildungen 5–8 befinden sich in Tabelle 3.

Bei einer konstanten vertikalen Amplitude von 10 mm und einem Schwingungsrichtungswinkel von 0° (liegende Ellipse) bewirkt eine geringere horizontale Amplitude eine Reduzierung der Kornverluste. Die geringere Amplitude bewirkt eine geringere Fördergeschwindigkeit und somit eine Erhöhung der zur Entmischung und Abscheidung verfügbaren Zeit. Wie in dem Diagramm ersichtlich, ist der Zusammenhang zwischen Kornverlust und horizontaler Amplitude nicht linear, bei Steigerung der horizontalen Amplitude von  $a_h = 20$  mm auf  $a_h = 25$  mm ist ein geringer Anstieg der Kornverluste zu beobachten. Bei weiterer Erhöhung auf  $a_h = 30$  mm ist jedoch eine Verdopplung der Verluste ersichtlich. Eine weitere Reduzierung der horizontalen Amplitude ist nicht sinnvoll, da ein sicherer Gutfluss bei kleineren Amplituden nicht gewährleistet werden kann.

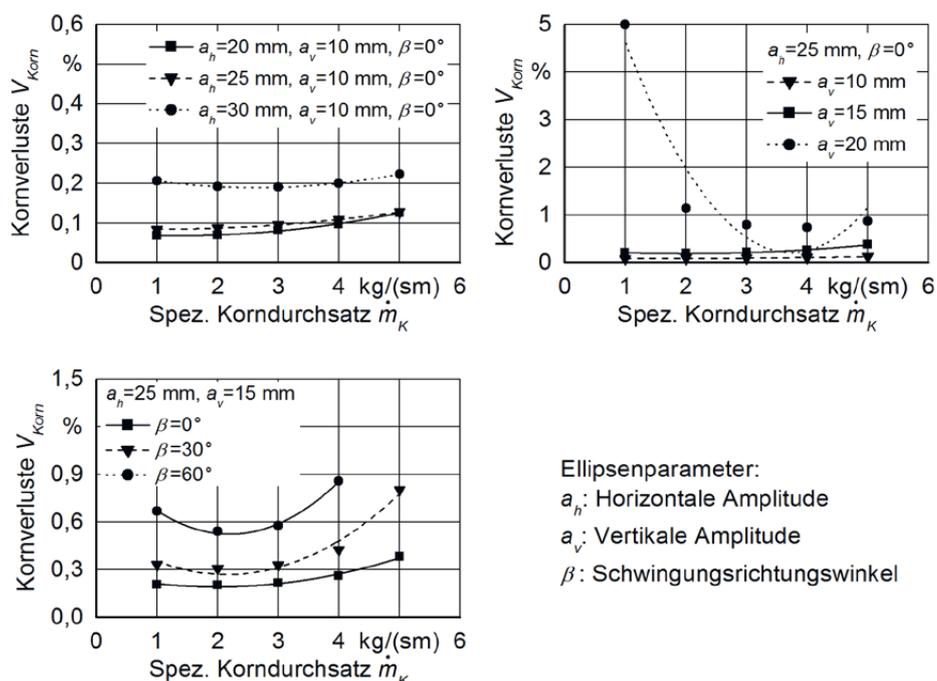


Abbildung 5: Einfluss der horizontalen und vertikalen Amplituden sowie des Schwingungsrichtungswinkels auf die Kornverluste auf Basis einer Regressionsanalyse mit quadratischem Regressionsansatz

Bei Reduzierung der vertikalen Amplitude von  $a_v = 20$  mm auf  $a_v = 10$  mm bei konstanter horizontaler Amplitude von 25 mm und konstantem Schwingungsrichtungswinkel von  $0^\circ$  (liegende Ellipse) werden auch die Kornverluste reduziert. Die geringeren Beschleunigungen normal zum Sieb bewirken eine geringere Verdichtung der unteren Haufwerksschicht, welche sich positiv auf den Entmischungsprozess auswirkt (BERNHARDT 2015). Zu beachten ist hier die Interaktion der Amplituden untereinander. So wurde beobachtet, dass eine größere horizontale Amplitude geringere Kornverluste ermöglicht als eine größere vertikale Amplitude. Gleiche Ergebnisse konnte Bernhardt (2015) bei der Untersuchung elliptischer Bahnkurven auf dem Hordenschüttler feststellen. Die geringsten Kornverluste konnten bei einem Schwingungsrichtungswinkel von  $0^\circ$  (liegende Ellipse) ermittelt werden. Somit ergeben sich als Parametersatz, in denen die Kornverluste minimal sind, folgende Werte:

- horizontale Amplitude: 20–30 mm
- vertikale Amplitude: 10–15 mm
- Schwingungsrichtungswinkel:  $0^\circ$  (liegende Ellipse)

Zur Überprüfung der mit der Regression berechneten Parameter wurden vollfaktorielle Versuchsreihen in einem Durchsatzbereich von 1–5 kg/(s · m) aufgenommen (Tabelle 2).

Tabelle 2: Parametersatz der vollfaktoriell aufgenommenen Versuche im geringen Verlustbereich

Nr.	Horizontale Amplitude in mm	Vertikale Amplitude in mm	Schwingungsrichtungswinkel in $^\circ$
1	25	10	0
2	25	15	0
3	30	15	0

Ein Vergleich der Ergebnisse der Regressionsanalyse mit denen der messtechnisch bestimmten vollfaktoriellen Versuche zeigen eine nahezu konstante Abweichung in einem Durchsatzbereich von 1–3 kg/(s · m), Abbildung 6. Bei größeren Durchsätzen sind deutlich größere Unterschiede auf einem Niveau von 1 % erkennbar. Durch die geringere Versuchsichte im Bereich großer Durchsätze erfolgte die Regressionsberechnung über größere Intervalle, was zu größeren Interpolationsfehlern führte. Die bei der vollfaktoriellen Versuchsreihe ermittelte Reinheit ist über dem gesamten Durchsatzbereich höher als die Werte der Regressionsanalyse. Aufgrund der Unterschiede sind die Ergebnisse der Regressionsanalyse nur für eine tendenzielle Aussage geeignet. Für eine quantitative Aussage müssen Versuche mit den entsprechenden Anregungsparametern durchgeführt werden. Es ist generell möglich, die Genauigkeit der Regressionsanalyse durch eine höhere Anzahl an Versuchen im teilfaktoriellen Versuchsplan zu erhöhen und somit die Interpolationsunsicherheit zu verringern. Jedoch läge der Versuchsaufwand im Bereich des Aufwandes zur Aufnahme der vollfaktoriellen Durchsatzkurven, weshalb dieses Vorgehen nicht angewendet wurde.

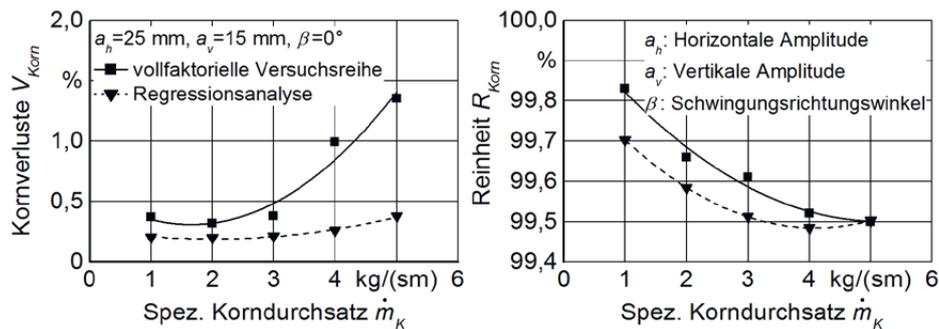


Abbildung 6: Vergleich von Kornverlust und Reinheit einer vollfaktoriellen Verlustkurve mit den Ergebnissen aus der Regressionsanalyse mit quadratischem Regressionsansatz

Die Ergebnisse der vollfaktoriellen Durchsatzkurven mit den Anregungsparametern aus Tabelle 2 bestätigen die quantitativen Aussagen der Regressionsanalyse (Abbildung 7). In Analogie zu der Regressionsanalyse aus dem teilfaktoriellen Versuchsplan erfolgt die Interpolation hier ebenfalls mithilfe eines quadratischen Ansatzes. Die Durchsatzkurve bei einer horizontalen Amplitude von 25 mm und einer vertikalen Amplitude von 10 mm ist über einen Durchsatzbereich von 1–4 kg/(s · m) die Kurve mit den geringsten Kornverlusten.

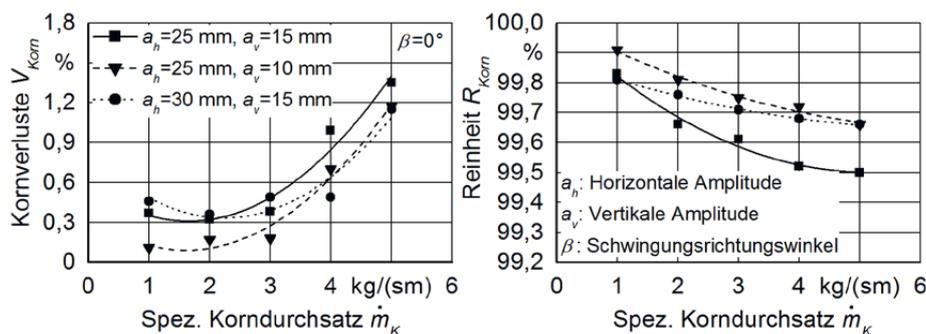


Abbildung 7: Vergleich elliptische Siebbewegungen mit unterschiedlichen Anregungsparametern

Die Reinheit ist bei diesen Anregungsparametern im gesamten Durchsatzbereich am höchsten. In einem Durchsatzbereich von 4-5 kg/(s · m) weist die Kornverlustkurve mit der horizontalen Amplitude von 30 mm und der vertikalen Amplitude von 15 mm die geringsten Verluste auf. Aufgrund des höheren Durchsatzes steigt die Gutschicht auf dem Sieb. Zur optimalen Entmischung ist deshalb eine größere mechanische Anregung nötig. Dies bedeutet, dass die Anregungsparameter mit den geringsten Kornverlusten in Abhängigkeit vom Durchsatz festgelegt werden müssen. Zu beachten ist, dass die Kornverluste der Kurve mit  $a_h = 30$  mm und  $a_v = 15$  mm in einem großen Durchsatzbereich geringer sind als die Kornverluste der Kurve mit  $a_h = 25$  mm und  $a_v = 15$  mm, was die Forderung einer größeren horizontalen Amplitude bestätigt. Ein Vergleich der Kurven mit  $a_h = 25$  mm und  $a_v = 15$  mm bzw. 10 mm zeigt geringere Kornverluste bei kleineren Amplituden. Dies bestätigt die Aussage der Verbesserung des Entmischungs- und Abscheideprozesses durch die Verringerung der Verdichtungen in der unteren Haufwerksschicht.

Aus dem Vergleich der elliptischen Siebbewegung mit  $a_h = 25$  mm und  $a_v = 10$  mm mit den Referenzkurven der linearen und kreisförmigen Siebbewegung wird der Vorteil der elliptischen Siebbewegung in einem Durchsatzbereich von 1-3,5 kg/(s · m) erkennbar (Abbildung 8). Wie beim Linearschwinger steigen die Kornverluste mit zunehmenden Korndurchsatz an und sind über den gesamten Durchsatzbereich auf einem geringfügig niedrigeren Niveau. Aufgrund der geringen Durchsatzempfindlichkeit sind die Kornverluste beim Kreisschwinger bei sehr hohen Durchsätzen am geringsten. Die elliptische Siebbewegung zeigt im Gegensatz zur linearen und kreisförmigen Siebbewegung über den gesamten Durchsatzbereich eine höhere Reinheit. Zu beachten ist, dass die ausgewählten Referenzkurven nicht die Kurven mit den geringsten Kornverlusten und höchsten Reinheiten sein müssen. Die elliptische Siebbewegung ermöglicht geringe Kornverluste. Jedoch konnte in Analogie zur kreisförmigen Siebbewegung eine geringere Durchsatzempfindlichkeit nicht beobachtet werden. Zur weiteren Optimierung der elliptischen Siebbewegung sollen nun Versuche mit zusätzlichen Einflussparametern wie die pneumatische Anregung und die Siebfrequenz aufgenommen und analysiert werden.

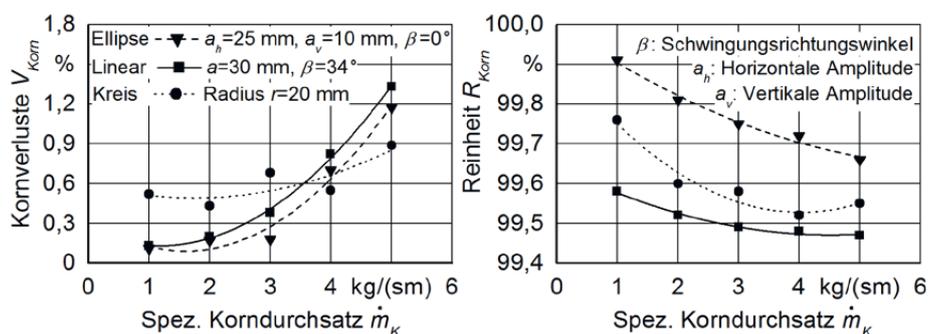


Abbildung 8: Vergleich von elliptischer, kreisförmiger und linearer Siebbewegung

Für die Regressionsberechnung des statistischen Versuchsplans sowie für die Interpolation der vollfaktoriellen Versuchsreihen wurde ein quadratischer Ansatz gewählt:  $y = A + Bx + Cx^2$ . In Tabelle 3 sind die Regressionsparameter  $A$ ,  $B$ ,  $C$  sowie die korrigierten Bestimmtheitsmaße  $\bar{R}^2$  notiert.

Tabelle 3: Regressionsparameter und Bestimmtheitsmaße

Beschreibung	$a_h$ in mm	$a_v$ in mm	$\beta$ in °	$A$	$B$	$C$	$\bar{R}^2$
<b>Bild 5</b>							
Verluste	20	10	0	0,075	-0,011	0,004	0,997
Verluste	25	10	0	0,086	-0,005	0,003	0,997
Verluste	30	10	0	0,232	-0,032	0,006	0,999
Verluste	25	15	0	0,272	0,080	0,020	0,968
Verluste	25	20	0	8,438	-4,406	0,59	0,816
Verluste	25	15	30	0,561	-0,270	0,063	0,930
Verluste	25	15	60	1,019	-0,450	0,100	0,981
<b>Bild 6</b>							
Verluste, vollfaktoriell	25	15	0	0,578	-0,324	0,098	0,919
Reinheit, vollfaktoriell	25	15	0	99,99	-0,191	0,019	0,963
Verluste, Regressionsanalyse	25	15	0	0,270	-0,079	0,020	0,965
Reinheit, Regressionsanalyse	25	15	0	99,86	-0,186	0,0227	0,999
<b>Bild 7</b>							
Verluste	25	15	0	0,578	-0,324	0,098	0,919
Reinheit	25	15	0	99,99	-0,191	0,019	0,963
Verluste	25	10	0	0,336	-0,305	0,095	0,958
Reinheit	25	10	0	100	-0,106	0,008	0,970
Verluste	30	15	0	0,832	-0,445	0,099	0,815
Reinheit	30	15	0	99,87	-0,072	0,006	0,997
<b>Bild 8</b>							
Ellipse, Verluste	25	10	0	0,336	-0,305	0,095	0,958
Ellipse, Reinheit	25	10	0	100	-0,106	0,008	0,97
Linear, Verluste	$a = 30$ mm		34	0,236	-0,187	0,081	0,996
Linear, Reinheit	$a = 30$ mm			99,65	-0,077	0,009	0,977
Kreis, Verluste	Radius $r = 20$ mm			0,596	-0,120	0,034	0,420
Kreis, Reinheit	Radius $r = 20$ mm			99,92	-0,196	0,024	0,900

### Simulation

Parallel durchgeführte DEM-CFD-Simulationen erlauben eine detaillierte Untersuchung des Entmischungs- und Abscheideprozesses. Zur Abbildung der Geometrie wurden die CAD-Daten des Reinigungsprüfstandes herangezogen. Die DEM-Simulation wurde mit der Software EDEM, die Strömungssimulation mit der Software Ansys Fluent durchgeführt. Dabei wurde eine 1-Wege-Kopplung realisiert, bei der das Strömungsfeld in der Mittelposition bei Vorbewegung des unbeladenen Lamellensiebes berechnet wurde. Bei der 1-Wege-Kopplung hat die Luftströmung eine Kraftwirkung auf die Partikel, jedoch haben diese keine Rückwirkung auf das Strömungsfeld. Für einen Vergleich zwischen Simulation und Experiment wurde ebenfalls die experimentelle Versuchsdurchführung in der Simulation nachgebildet und die Eigenschaften der in der Simulation verwendeten DEM-Partikel

wurden in Anlehnung an die Stoffeigenschaften des in dem Experiment verwendeten Kornes und NKB modelliert (BECKMANN et al. 2016). Die Simulation wurde auf einer Workstation mit 8 Kernen und 16 GB Arbeitsspeicher gerechnet. Dabei beträgt die simulierte Versuchszeit 16 s. In der stationären Phase befinden sich bei einem Durchsatz von 3 kg/(s · m) 105.650 Partikel in der Simulation.

Ein Vergleich der Kornabscheiderate und der Abscheidelänge zwischen Simulation und Experiment für eine lineare Siebbewegung mit einem spezifischen Korndurchsatz von 4 kg/(s · m) und eine elliptische Siebbewegung mit einem spezifischen Korndurchsatz von 3 kg/(s · m) zeigt eine betragsmäßige mittlere Abweichung von maximal 6 % (Abbildung 9). Allgemein sind im Experiment höhere Abscheideraten bei einer Sieblänge von 0,3 m zu beobachten. Dem gegenüber steht eine höhere Kornabscheiderate in der Simulation bei einer Sieblänge im Bereich von 0,6–0,9 m. Bei dem Vergleich der Abscheidelänge für die lineare Siebbewegung über verschiedene Korndurchsätze fallen die größeren Abweichungen bei kleinen Durchsätzen auf. Bei der elliptischen Siebbewegung sind Abweichungen bei kleinen und großen Durchsätzen auffällig, weshalb die betragsmäßige mittlere Abweichung hier maximal ist. Die Abweichungen zwischen Simulation und Experiment sind mit der Idealisierung der Partikel in der Simulation, aber auch mit den Grenzen der 1-Wege-Kopplung zu begründen. Jedoch ist die Genauigkeit ausreichend, um anhand der Kornabscheidung und der Abscheidelänge Versuche mit unterschiedlichen Anregungsparametern in Analogie zum Experiment zu bewerten. Des Weiteren ist die Genauigkeit der Simulation unabhängig vom Durchsatz oder von der Bewegung des Siebes. Aus diesem Grund ist die Simulation als unterstützende, aber auch als alleinige Untersuchungsmethode zur Analyse der elliptischen Siebbewegung geeignet.

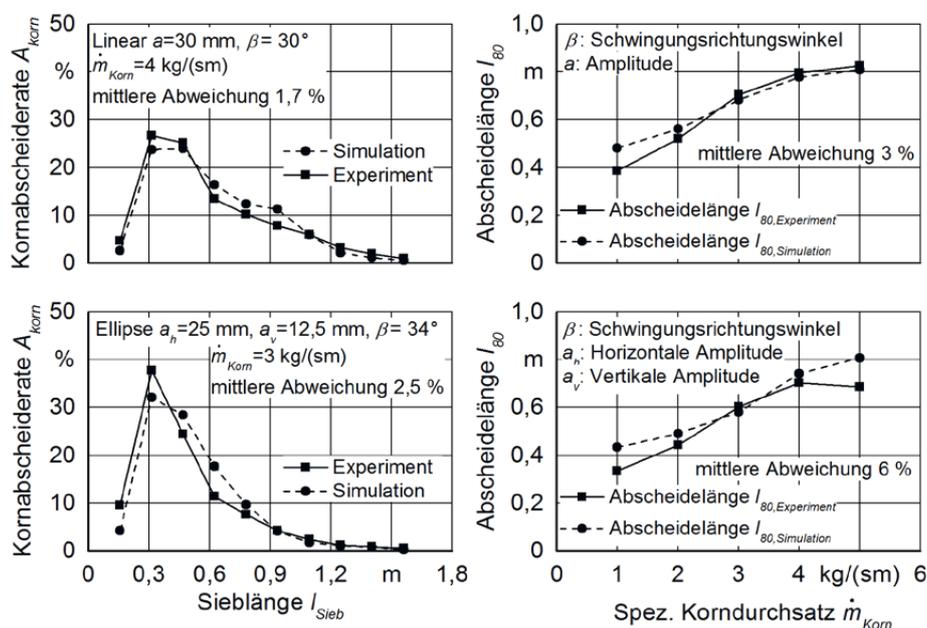


Abbildung 9: Vergleich der Kornabscheiderate und der Abscheidelänge von Simulation und Experiment für eine lineare (BECKMANN et al. 2016) und eine elliptische Siebbewegung

## Schlussfolgerungen

Zur Untersuchung der Arbeitsweise der Mährescherreinigung in Abhängigkeit der Bewegungsform des Siebes wurde der am Institut vorhandene Reinigungsprüfstand um einen Antrieb erweitert, mit dem neben linearen und kreisförmigen auch elliptische Siebbewegungen mit unterschiedlichen Amplituden und Frequenzen untersucht werden können. Die elliptische Siebbewegung bietet die Möglichkeit für unterschiedliche Beschleunigungswerte in Siebrichtung bzw. normal zum Sieb und damit eine höhere Flexibilität. Zur Reduzierung des Versuchsaufwandes wurde ein teilfaktorierter Versuchsplan aufgenommen und mittels Regressionsanalyse die Anregungsparameter ermittelt, bei denen minimale Kornverluste zu erwarten sind. Nachgeschaltete vollfaktorierete Durchsatzkurven ermöglichten die quantitative Bestimmung der Kornverluste und der Reinheit sowie eine Abschätzung der Genauigkeit der Regressionsanalyse. Durch einen Vergleich mit Referenzkurven der linearen und kreisförmigen Anregung zeigte sich das Potenzial der elliptischen Siebbewegung, wobei die optimalen Anregungsparameter abhängig vom Durchsatz sind. Folgend sind weitere Untersuchungen mit zusätzlichen Einflussgrößen wie die pneumatische Anregung und der Siebfrequenz nötig, um die elliptische Siebbewegung weiter zu untersuchen. Parallel durchgeführte DEM-CFD-Simulationen zeigten eine betragsmäßig mittlere Abweichung in der Kornabscheiderate und der Abscheidelänge von maximal 6 %. Diese Abweichungen sind unabhängig vom Durchsatz und der Bewegungsform des Siebes, weshalb die Simulation zur Untersuchung der Arbeitsweise der Mährescherreinigungsanlage geeignet ist.

## Literatur

- Beckmann, K., Pfortner, J.; S. Böttinger (2016): Untersuchung mechanischer Siebanregungen auf die Korn-Stroh-Trennung in der Mährescherreinigung. In: VDI-Berichte Nr. 2273, Düsseldorf, VDI Verlag, S. 429–436
- Bernhardt, J. (2015): Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Optimierung der Korn-Stroh-Trennung am Hordenschüttler unter Verwendung alternativer Bahnkurven. Dissertation, Technische Universität Dresden, VDI Fortschrittsberichte, Reihe 14, Nr. 144, Düsseldorf
- Böttinger, S. (1993): Die Abscheidefunktion von Hordenschüttler und Reinigungsanlage in Mähreschern. Dissertation, Universität Stuttgart, VDI Fortschrittsberichte, Reihe 14, Nr. 66, Düsseldorf
- 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, Stuttgart
- Damm, J. (1972): Der Sortiervorgang beim luftdurchströmten Schwingsieb. Dissertation Universität Hohenheim, VDI Fortschrittsberichte, Reihe 3, Nr. 37, Düsseldorf
- Freye, T. (1980): Untersuchungen zur Trennung von Korn-Spreu-Gemischen durch die Reinigungsanlage des Mähreschers. Dissertation Universität Hohenheim, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der VDI-MEG, Nr. 47, Stuttgart
- Meyer, A. (2015): Konzeption, Entwicklung und Inbetriebnahme eines Reinigungsprüfstandes mit elliptischer Schwingungsanregung. Masterarbeit, Universität Stuttgart (unveröffentlicht)
- Rothaug, S., Böttinger, S.; H.D. Kutzbach (2006): Investigations on a combine cleaning unit with circular oscillation. World Congress: Agricultural Engineering for a Better World/ EurAgEng/ VDI, 03.-07.09.2006 Bonn. In: VDI-MEG, VDI-Berichte Nr. 1958, Düsseldorf, VDI Verlag, S. 145–146
- Rothaug, S., Wacker, P., Yin, W.; H.D. Kutzbach (2003): Capacity Increase of Cleaning Units by Circular Oscillation. International Conference on Crop Harvesting and Processing, 9–11 February 2003, Louisville, Kentucky, USA
- Rothaug, S.; H.D. Kutzbach (2005): Neue Ergebnisse zur Kreisreinigung. VDI-MEG Kolloquium Landtechnik 17/18. 03.2005. In: VDI-MEG, Mährescher, Heft 38, S. 137–143

Yin, W., P. Wacker; H.D. Kutzbach (2001): Mährescher-Reinigungsanlage. Landtechnik 56(4), S. 276–277, <http://dx.doi.org/10.1515/lt.2001.1780>

Zehme, C. (2006): Beitrag zur Klärung der Kornabscheidung(Frye aus einem homogenen Korn-Stroh-Spreu-Gemisch mit Hilfe eines luftdurchströmten, in seiner Ebene schwingenden horizontalen Plansiebes, dargestellt am Beispiel der Gutart Weizen. Dissertation, Technische Universität Dresden

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, Stuttgart

## Autoren

**M. Sc. Konstantin Beckmann** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter, **Dipl.-Ing. Joachim Pförtner** ist ehemaliger wissenschaftlicher Mitarbeiter und **Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttiger** ist Leiter des Fachgebiets Grundlagen der Landtechnik der Universität Hohenheim, Garbenstr. 9, 70599 Stuttgart, Email: Konstantin.Beckmann@uni-hohenheim.de

Das Thema wurde auf der VDI-Tagung LAND.TECHNIK 2016, Köln, 22.–23. November 2016, vorgestellt und eine Kurzfassung im VDI-Bericht veröffentlicht (Bd. 2273, S. 429–436).