

# Wirkungsweise mechanischer Reinigungswerkzeuge für Zuckerrüben

Peter Degen  
Zweibrücken

Zuckerrüben und Erdpartikel kommen in einem gemeinsamen Haufwerk als lose und anhaftende Bestandteile vor. Die Erde wird in Löse- und Trennprozessoperationen aus dem Zuckerrüben-Erdgemisch entfernt. Dies geschieht bei der landwirtschaftlichen Ernte mit mechanischen Reinigungswerkzeugen. Sie werden anhand von zwei Modellen auf ihre Wirkungsweise hin untersucht. Mit einem Wirkflächenmodell wird der Werkzeugaufbau beschrieben und verschiedene Typen verglichen. In einem dynamischen Wirkmodell werden die reinigungsrelevanten Prozessoperationen Lösen und Trennen definiert. Beiden Operationen liegt der Impulseintrag vom Reinigungswerkzeug in das Zuckerrüben-Erdhaufwerk zugrunde. Adhäsionsbindungen und Kohäsionsbindungen werden aufgebrochen und anhaftende Erdpartikel in lose überführt. Ebenso bewirkt der Impulseintrag beim Trennen die Durchmischung des Haufwerkes, um lose Partikel abzutrennen. Ein Stoßmessdetektor wird eingesetzt, um die vom Reinigungswerkzeug abgegebenen Stöße quantitativ und qualitativ zu messen. Diese werden mit qualitätsbeschreibenden Parametern von Zuckerrüben, wie Erdanteil und Oberflächenbeschädigung verglichen.

## Schlüsselwörter

Zuckerrüben, Erntemaschinen, Löseprozesse, Trennprozesse, Reinigung, Stöße, Siebsterne

## Einleitung

Zuckerrüben gehören aufgrund ihrer vielfältigen Verwertungsmöglichkeiten zu den erlösstärksten landwirtschaftlichen Feldkulturen. Aus ihnen wird Zucker als wertgebender Inhaltsstoff mit einer hohen Reinheit von bis zu 99,5% extrahiert. Zucker ist neben der Nutzung als Lebensmittel ein wichtiger Grundstoff in der chemischen Industrie. Um eine effiziente Steuerung der mechanischen Extraktionsprozesse zu ermöglichen, muß die Rohware Zuckerrüben definierte Qualitätsanforderungen erfüllen. Hierzu gehört der Anteil an Erde, Steinen, Rübenköpfen und Blättern, wovon Erde den größten Störeinfluß auf die Weiterverarbeitung hat. Im Mittel der vergangenen 10 Jahre lag der Erdanteil durchschnittlich bei 12% mit fallender Tendenz [8].

Bei ungünstigen Erntebedingungen werden mit den Erntemaschinen große Mengen Erde in anhaftender und loser Form aufgenommen. Sie werden trotz mehrstufiger Reinigungssysteme in den Erntemaschinen und der Feldrandreinigung nicht vollständig aus dem Zuckerrübenengut abgereinigt.

und Zusammensetzung unerwünschter Erdbeimengungen im Zuckerrübenenerntegut ist eine wesentliche Führungsgröße bei Auslegung und Einstellung der einzelnen Reinigungselemente. Neu entwickelte Sensortechnologien tragen dazu bei, dass der Betrieb von Reinigungswerkzeugen permanent im optimalen Wirkungsbereich der Reinigung erfolgen kann [2, 4, 5]. Um das Nutzungsspektrum bekannter Reinigungswerkzeuge auszuschöpfen bzw. neue Werkzeuge zu entwickeln, ist die Kenntnis von Wirkung und Ursache unabdinglich. Am Beispiel der Zuckerrübenreinigung wird daher die Wirkungsweise mechanischer Reinigungswerkzeuge erläutert und in Wirkmodellen dargestellt.

## Wirkflächenmodell

Am Beispiel eines Siebstersns werden die erforderlichen technischen Voraussetzungen des Reinigungswerkzeuges anhand eines Wirkflächenmodells erläutert (siehe Bild 2).

Als Löseflächen  $A_{16}$  werden alle Flächen eines fördernden Reinigungsorgans bezeichnet, auf denen das Erntegut in mechanischem Eingriff mit dem Werkzeug

Das in der Maschine in **Bild 1** verwendete Reinigungssystem setzt sich aus einem Wendelwalzenbett, einem Siebband und einer dreiteiligen Siebsternekomination zusammen. Die Verringerung von Menge

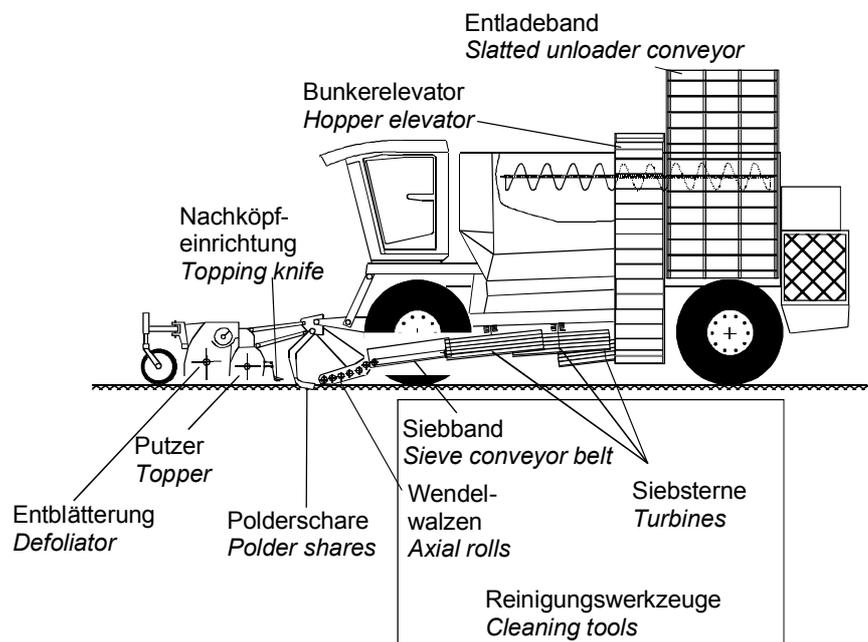


Bild 1: Mehrstufiges System der Reinigungswerkzeuge in einem Zuckerrübenvollernter

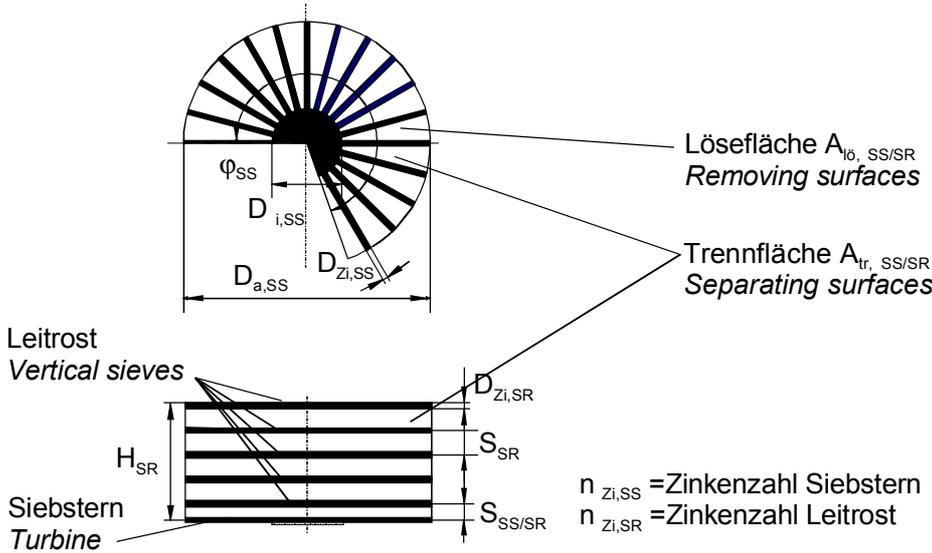


Bild 2: Wirkflächendefinition eines Siebsters mit zugeordnetem Leitrost

steht. Das Gut lagert sich aufgrund von Schwerkraft oder Beschleunigungskräften an die sich bewegende Flächen. Diese greifen in den Gutstrom ein und bewirken einen Impulseintrag in das Gut. Dieser Eintrag zwischen Reinigungswerkzeug und Gut bewirkt das Auflösen der Adhäsions- und Kohäsionsbindungen zwischen Zuckerrüben und Erde. Die Anzahl abtrennbarer Feingutpartikel im Gutstrom auf dem Reinigungswerkzeug erhöht sich. Für einen Siebsterne mit zugeordnetem Siebrost werden die Löseflächen definiert zu:

$$A_{lo\_SS/SR} = \frac{\varphi_{SS}}{360^\circ} \frac{\pi}{4} (D_{a,SS}^2 - D_{i,SS}^2) \quad (1)$$

Trennflächen sind offene vertikale und horizontale Flächen eines Reinigungswerkzeuges. An diesen werden Feingutpartikel aus dem Aufgabegutgemisch abgetrennt. Bei einem Siebsterne sind Trennflächen definiert:

$$A_{tr\_SS/SR} = \frac{\varphi_{SS}}{360^\circ} \left( \frac{\pi}{4} (D_{a,SS}^2 - D_{i,SS}^2) - n_{zi,SS} \cdot D_{zi,SS} \cdot \frac{1}{2} (D_{a,SS} - D_{i,SS}) + \pi \cdot D_a \cdot (H_{SR} - n_{zi,SR} \cdot D_{zi,SR}) \right) \quad (2)$$

In Zuckerrübenerntemaschinen werden in der Regel einzelne Reinigungswerkzeuge zu einem System zusammengefaßt. Aufgrund ihres spezifischen Aufbaus haben die Werkzeuge unterschiedliche Trenn- und Löseflächenanteile und damit unterschiedliche Reinigungswirkung. Die Reinigungswerkzeuge des Roders in Bild 1 werden anhand der vorgestellten Definition verglichen. Wendelwalzen haben mit 44% an der gesamten Lösefläche den größten Anteil. Bedingt durch die geringe Spaltweite zwischen den Walzen ist der

Trennflächenanteil mit nur 6% gering. Die Siebsterne in der Nachreinigungsphase haben mit 73% den höchsten Trennanteil bei einem ebenso hohen Löseflächenanteil von 33% [3]. Sie verbinden daher als Reinigungsorgan für Zuckerrübenerntemaschinen beide Wirkmechanismen zum Lösen anhaftender Partikel und zum anschließenden Trennen sehr gut.

### Dynamisches Wirkmodell

Die dynamische Wirkung mechanischer Löse- und Trennwerkzeuge auf die einzelnen Haufwerkspartikel hängt neben der konstruktiven Gestaltung vom dynamischen Bewegungszustand ab. Das Aufga-

begut erfährt vom Reinigungswerkzeug einen Impulseintrag. Dieser bewirkt neben der permanenten Durchmischung des Gutes und seiner Förderung die Übertragung von Stoßkräften, die zum Lösen und Abtrennen der abzureinigenden Beimengungspartikel erforderlich sind.

Die Haftbrücken werden aufgebrochen und anhaftende Beimengungspartikel gelöst. Sie können dann aufgrund geometrischer Unterschiede zu den Zuckerrüben aus dem Gutstrom abgetrennt werden. Es müssen also zwei Bedingungen erfüllt sein, damit anhaftende Erdpartikel von den Zuckerrüben abgelöst und dann abgetrennt werden können. Erstens ist eine Mindestimpulshöhe erforderlich, um die Haftbrücken aufzubrechen. Zweitens müssen die Auftreffpunkte der Stöße dort sein, wo viele Erdpartikel anhaften. Diese Stellen mit hohem Adhäsionsvermögen der Erdpartikel befinden sich bei Zuckerrüben besonders häufig an den Wurzelansatzflächen und im Rodescharbereich. Daher wird im dynamischen Wirkmodell neben der Bestimmung der Stoßintensität und Stoßhäufigkeit die Verteilung der Stöße auf der Mantelfläche der Zuckerrüben für die Bestimmung der Wirksamkeit von mechanischen Reinigungswerkzeugen benutzt.

In Bild 3 wird die Lage des Stoßmesswertgebers in einem rübenähnlichen Modellkörper dargestellt. Dieser Modellkörper wird dem Zuckerrübenstrom in einem Reinigungswerkzeug beigegeben. Beim Durchlauf der Reinigungsstrecke werden die Stöße vom Werkzeug und von den anderen Gutpartikeln auf den Mo-

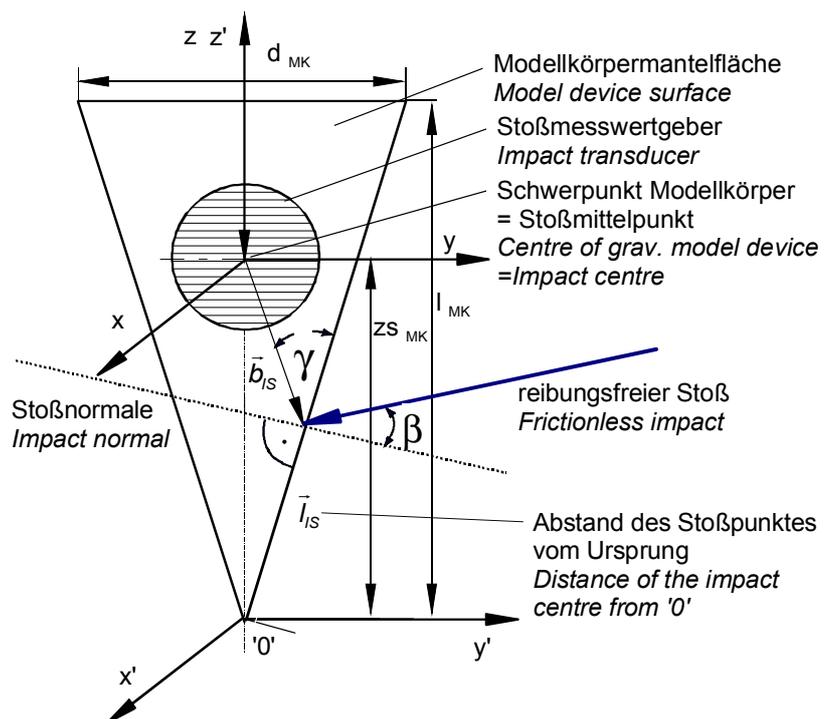


Bild 3: Stoßmesswertgeber und Definition der geometrischen Größen

dellkörper aufgezeichnet. Mit dem Messwertgeber wird der reibungsfreie Anteil jedes Stoßes in Stoßnormalenrichtung aufgezeichnet:

$$h_{IS} = \cos \beta \cdot \sin \gamma \cdot \int F dt \quad (3)$$

Für die Untersuchung steht das translatorische Bewegungsverhalten der Zuckerrüben im Vordergrund. Somit reduzieren sich die sechs Freiheitsgrade auf drei translatorischen Bewegungsgleichungen. Reibung in Folge exzentrischer Stöße wird vernachlässigt. Zentrale Stöße werden als Ursache der translatorischen Bewegung durch einen im Schwerpunkt des rübenähnlichen Körpers befindlichen Stoßmessgeber in den drei Achsen  $x$ ,  $y$  und  $z$  gemessen. Durch Umrechnung auf die Kegelmantelfläche des Messkörpers wird die Einwirkstelle des Stoßes ermittelt. Die Mantelfläche des Modellkörpers (Bild 3) wird durch folgende Gleichung definiert:

$$f(x, y, z) = \frac{x^2}{d_{MK}^2} + \frac{y^2}{d_{MK}^2} - \frac{(z - z_{MK})^2}{l_{MK}^2} = 0 \quad (4)$$

Die maximale Stoßhöhe  $h_{IS}$  ergibt sich durch Vektoraddition der Anteile in den drei Richtungen:

$$|\vec{h}_{IS}| = \sqrt{h_{IS,x}^2 + h_{IS,y}^2 + h_{IS,z}^2} \quad (5)$$

Der Berührungsvektor  $\vec{b}_{IS}$  eines Stoßes errechnet sich aus der Multiplikation der Stoßhöhe  $h_{IS}$  mit einem Skalar  $\lambda$ :

$$\vec{b}_{IS} = \begin{pmatrix} h_{IS,x} \\ h_{IS,y} \\ h_{IS,z} \end{pmatrix} \cdot \lambda = \begin{pmatrix} h_{IS,x} \cdot \lambda \\ h_{IS,y} \cdot \lambda \\ h_{IS,z} \cdot \lambda \end{pmatrix} \quad (6)$$

Es werden die mit dem Skalar multiplizierten Koordinaten aus Gleichung (6) in die Gleichung (4) eingesetzt und nach  $\lambda$  aufgelöst:

$$\lambda^2 + \lambda \frac{2 \cdot d_{MK}^2 \cdot z_{MK} \cdot h_{IS,z}}{l_{MK}^2 (h_{IS,x}^2 + h_{IS,y}^2) - d_{MK}^2 \cdot h_{IS,z}^2} - \frac{d_{MK}^2 \cdot z_{MK}^2}{l_{MK}^2 (h_{IS,x}^2 + h_{IS,y}^2) - d_{MK}^2 \cdot h_{IS,z}^2} = 0 \quad (7)$$

Ein physikalisch sinnvolles Ergebnis für das Skalar  $\lambda$  ergibt sich nur, wenn  $\lambda > 0$  gilt. Die Länge des Berührungsvektors  $b_{IS}$  ist sonst negativ. Aufgrund des ungerichteten Stoßeintrages in das Reinigungsgut werden nur die Stöße als relevant definiert, die auf die Kegelmantelfläche des Modellkörpers einwirken. Stöße auf der Stirnkreisfläche sind nicht reinigungsrelevant, da sich an der Köpffläche von Zuckerrüben keine anhaftende Erde befindet. Daher wird folgende Fallunterscheidung bei der Auswertung vorgenommen:

Reinigungsrelevante Stöße:

$$-z_{MK} < h_{IS,z} \cdot \lambda < (l_{MK} - z_{MK}) \quad (8)$$

Nicht reinigungsrelevante Stöße:

$$h_{IS,z} \cdot \lambda > (l_{MK} - z_{MK}) \quad (9)$$

$$\text{und } h_{IS,z} \cdot \lambda < z_{MK} \quad (10)$$

Zur weiteren Auswertung werden die Berührungspunkte vom Bezugssystem  $x$ ,  $y$ ,  $z$  des Schwerpunktkoordinatensystems auf das Ursprungs koordinatensystem  $x'$ ,  $y'$  und  $z'$  des Kegelzylinders verschoben.

$$\vec{l}_{IS} = \vec{b}_{IS} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z_{MK} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{IS,x} \cdot \lambda \\ h_{IS,y} \cdot \lambda \\ h_{IS,z} \cdot \lambda + z_{MK} \end{pmatrix} \quad (11)$$

Das Produkt des Stoßpunktvektors  $l_{IS}$  bezeichnet den Abstand des Stoßpunkts zum Ursprung '0' und ist damit ein Maß für die Verteilung der Stöße auf der Modellkörpermantelfläche.

## Versuche

Als Reinigungswerkzeug wird ein Siebsterne ausgewählt (Bild 4). Bei den Versuchen wird das Gut dem Stern über einen Vorratsbunker zugeführt. Versuchsparameter ist die Umfangsgeschwindigkeit  $v_{u,SS}$ . Die Auswertung erfolgt anhand der Parameter Stoßhöhe  $h_{IS}$ , Stoßanzahl  $n_{IS}$ , Verhältnis von theoretischer zu experimenteller Verweildauer  $t_{the} / t_{exp}$ , Standardabweichung Länge des Stoßpunktvektors  $l_{IS,SD}$ , Anteil Erde in den Zuckerrüben  $w_{mE,R}$  und anteilige beschädigte Oberfläche  $w_{OB,R}$ . Hierzu wird dem Gutstrom ein Stoßmeßwertgeber beigegeben [6].

Die theoretische Verweildauer  $t_{the}$  ergibt sich aus der Zeit bei der Bewegung eines Partikels auf der äußeren Siebsternekurvenbahn bei einem reibungsfreien Fördervorgang. Die experimentelle Verweildauer  $t_{exp}$  bestimmt sich aus der aufgezeichneten Differenz von Eintritts- zu Austrittszeit des Stoßmesswertgebers auf dem Siebsterne. Die anteilige Erdmasse mit Zuckerrüben  $w_{mE,R}$  bestimmt sich nach der IIRB Methode [1]. Die anteilige beschädigte Oberfläche  $w_{OB,R}$  ist das Verhältnis von beschädigter Fläche zu gesamter Kegelmantelfläche.

## Ergebnisse

Die Stoßhöhe  $h_{IS}$  steigt mit der Umfangsgeschwindigkeit  $v_{u,SS}$  mit einem Bestimmtheitsmaß  $B$  von 79% an (siehe Bild 5). So verdoppelt sich bei Zunahme der Umfangsgeschwindigkeit von 2m/s auf 6m/s die Stoßhöhe von 75 auf 160 Messeinheiten pro Versuchsdurchlauf.

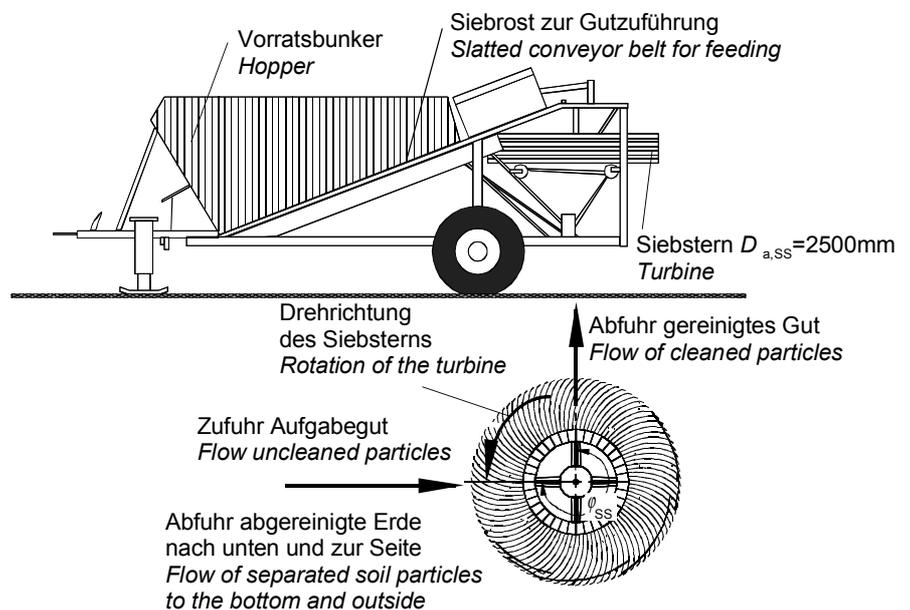


Bild 4: Versuchsanordnung mit Einzelsiebsterne

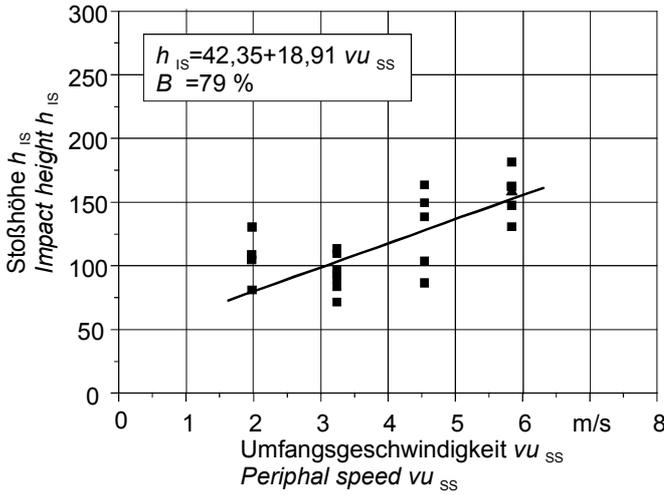


Bild 5: Korrelation Stoßhöhe  $h_{IS}$  und Umfangsgeschwindigkeit  $v_{U,SS}$

Das Verhältnis der Anzahl der Stöße in Klasse I (unter 200) zu Klasse II (über 200)  $n_{IS, VII}$  nimmt mit steigender Umfangsgeschwindigkeit  $v_{U,SS}$  ab (siehe Bild 6). Das geringe Bestimmtheitsmaß von 12% deutet auf eine nur geringe Korrelation hin. Geringe Stoßhöhen resultieren aus dem Zusammenstoß vom Modellkörper mit anderen Gutpartikeln. Die Stoßhöhe ist aufgrund der niedrigen Steifigkeit der Zuckerrüben geringer als bei Zusammenstößen mit Werkzeugteilen des Reinigungsorgans. Die Verteilung der gemessenen Stöße auf

der Kegelmantelfläche  $l_{IS,SD}$  des Modellkörpers korreliert mit der Stoßhöhe  $h_{IS}$  mit einem Bestimmtheitsmaß  $B$  von 65%. Hohe aufgezeichnete Stoßhöhen  $h_{IS}$  führen dazu, dass der Gutstrom zunehmend turbulenter wird und Stöße ungeordnet von den Gutpartikeln und Werkzeugen auf den Messwertgeber aufgezeichnet werden. Bei höheren Geschwindigkeiten wird eine größere Anzahl von zufallsbedingten Kontakten gemessen (Bild 7). Die spezifische Ausrichtung der Aufgabegutpartikel an die Werkzeuggeometrie kann nicht festgestellt werden. Das Werk-

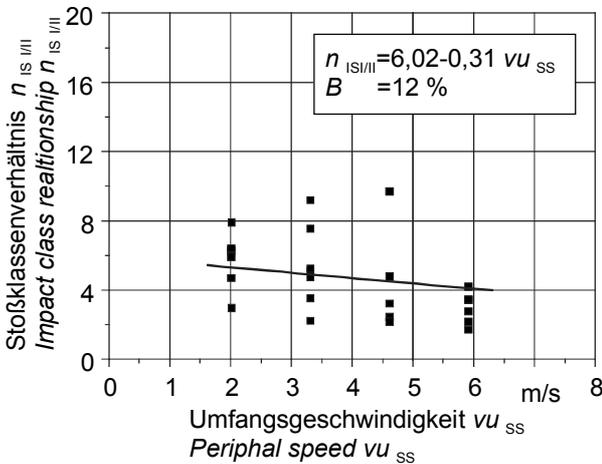


Bild 6: Korrelationen Stoßklassenverhältnis  $n_{IS, VII}$  und Umfangsgeschwindigkeit  $v_{U,SS}$

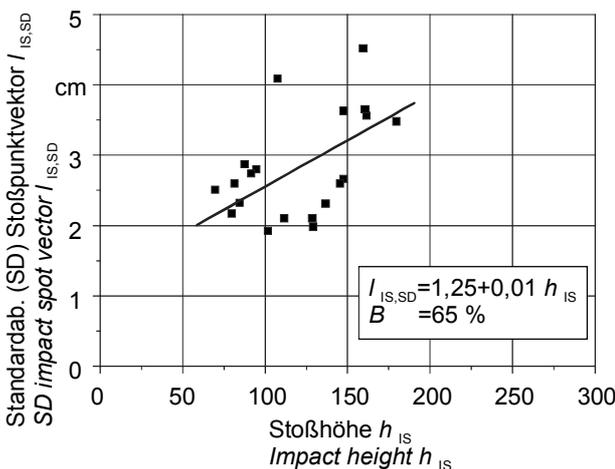


Bild 7: Korrelationen Standardabweichung (SD) Länge Stoßpunktvektor  $l_{IS,SD}$  und Stoßhöhe  $h_{IS}$

zeug überträgt Stöße ungeordnet auf den Modellkörper.

Das Aufgabegut lagerte sich an die beweglichen Teile des Werkzeuges an. Hierdurch ergeben sich bei niedrigen Umfangsgeschwindigkeiten hohe Förderraten. Bei zunehmender Umfangsgeschwindigkeit des Reinigungswerkzeuges wird der Gutfluß turbulent und die Relativgeschwindigkeit zwischen dem Reinigungswerkzeug und dem Aufgabegut nimmt zu. Das Verweildauerverhältnis  $t_{exp} / t_{the}$  korreliert mit einem Bestimmtheitsmaß  $B$  von 58% mit der Umfangsgeschwindigkeit  $v_{U,SS}$  (Bild 8).

Im Bild 9 sind die wertgebenden Parameter für Zuckerrüben, der Erdanteil  $w_{mE,R}$  und die anteilig beschädigte Kegelmantelfläche der Zuckerrüben in Abhängigkeit von der Stoßhöhe  $h_{IS}$  aufgetragen. Der Erdanteil korreliert mit einem geringen Bestimmtheitsmaß von 40% mit der Stoßhöhe. Dies liegt am sehr geringen Ausgangserdanteil im Aufgabegut von 6,7%. Durch den Siebsterne wird nur noch verhältnismäßig wenig Erde aus dem Zuckerrüben grobgrut abgereinigt. Ebenfalls wird bei einem Erdanteil unterhalb von 2 bis 3% die Messgrenze für das Waschverfahren erreicht. Das Bestimmtheitsmaß zur Beschreibung der Abhängigkeit von anteiliger Oberflächenbeschädigung und Stoßhöhe ist mit 79% wesentlich höher. Die Verdoppelung der mittleren Stoßhöhe von 75 auf 170 bewirkt ebenfalls eine Verdoppelung der Oberflächenbeschädigung von 0,5% auf 1,4%.

### Zusammenfassung

Durch die Interaktion von Werkzeug und Aufgabegut entsteht ein komplexes Verhalten der Gutpartikel auf dem Werkzeug. Die Reinigungswirkung entsteht durch Übertragung von Stoßimpulsen vom Werkzeug auf die Aufgabegutpartikel. Messbar ist die Wirkung eines Reinigungswerkzeuges durch einen Messwertgeber, mit dem Stöße aufgezeichnet werden.

Mit diesem Geber, der in einem rübenähnlichen Modellkörper eingefügt ist, wird durch Vergleich dieser Ergebnisse mit den qualitätsbeschreibenden Parametern von Zuckerrüben wie Erdanteil und anteiliger Oberflächenbeschädigung der Zusammenhang von Stoßspektrum und Guteigenschaften abgeleitet [3]. Mit diesem Ansatz kann Wirkungshöhe und -richtung von mechanischen Reinigungswerkzeugen durch den Einsatz von Sensoren quantifiziert werden. Vorstellbar ist ebenso die Nutzung der Ergebnisse der Arbeit zur vollständigen Simulation des Reinigungsprozesses.

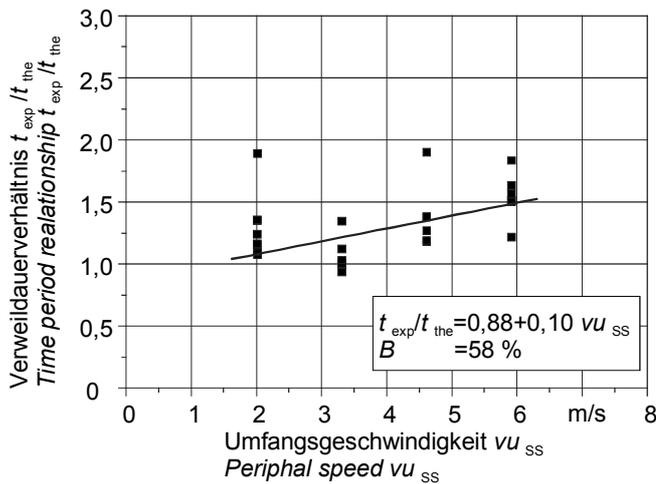


Bild 8: Verweildauerverhältnis  $t_{the}/t_{exp}$  und Umfangsgeschwindigkeit  $v_{u_{SS}}$

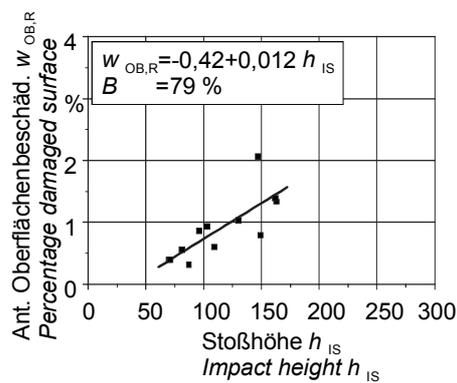
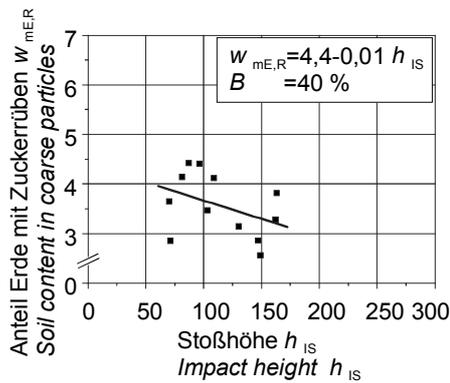


Bild 9: Korrelation Anteil Erde mit Zuckerrüben  $w_{mE,R}$  Anteilig beschädigte Oberfläche  $w_{OB,R}$  und Stoßhöhe  $h_{IS}$

## Literatur

Bücher sind mit • gekennzeichnet.

- [1] *Brinkmann, W.*: Die Testung der Arbeitsqualität von Zuckerrübenerntemaschinen - Die Methode des I.I.R.B. Die Zuckerrübe 35 (1986) H. 3, S. 144-148
- [2] *Degen, P. et al.*: Volume and Scale Based System Measuring Machine Capacity and Yield and Soil Tare of Sugar Beet. ASAE - Paper (1998) 98 3107
- [3] • *Degen, P.*: Untersuchungen zur Wirkungsweise mechanischer Löse- und Trennwerkzeuge bei Mehrstoffaufwerken aus Wurzelfrüchten am Beispiel der Zuckerrüben- Erdabtrennung.: Fortschritt-Berichte VDI Reihe 14, Nr. 97, 2000
- [4] *Hien, P. und Kromer, K. H.*: Roderinformationssysteme - Die Elektronik auf dem Weg in den Zuckerrübenroder. Zuckerrübe 44 (1995) H. 4, S. 190-193
- [5] *Hofmann, S.; Lungwitz, S. und Leithold, C.*: Reinigungsintensitätsregelung an Zuckerrübenerntemaschinen. Agrartechnik 37 (1987), S. 445f.
- [6] *Schuh, J.-P.; Fechner, W. und Uebe, N.*: Untersuchungen zur Anwendung elektronischer Rüben in der Zuckerrübenernte. Agrartechnische Forschung 3 (1997) H. 1 S. 59-65
- [7] *Thelen, M.*: Verluste minimieren - Maschinen optimieren. Deutsche Zuckerzeitung 5, (1998), S. 8-9
- [8] • *Verein Der Zuckerindustrie*: Jahresbericht 99/00, Verlag Dr. Albert Bartens, Berlin

## Autor

Dr.-Ing. Peter Degen  
war bis 1998 wissenschaftlicher Mitarbeiter am  
Institut für Landtechnik Bonn  
(Direktor Prof. Dr.-Ing K.-H. Kromer)  
Nussallee 5  
53115 Bonn

Dr. Degen ist Mitarbeiter der  
John Deere Werke Zweibrücken  
Homburgerstr. 117  
66482 Zweibrücken  
E-mail: dienstl: [DegenPeter@JohnDeere.com](mailto:DegenPeter@JohnDeere.com)  
E-mail: priv.: [petdegen@t-online.de](mailto:petdegen@t-online.de)